

ЭлСиК

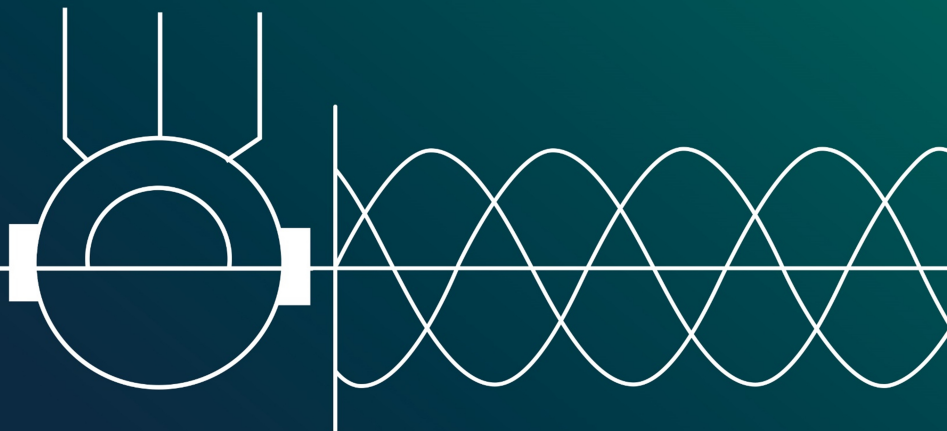
ISSN 2311-8318

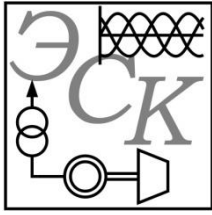
ISSN (online) 2658-3151

ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

№ 4(53)

2021 г.





ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 4(53), ДЕКАБРЬ 2021

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, а также в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Редакционная коллегия

Председатель редакционной коллегии:

С.И. Лукьянов – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Главный редактор:

В.Р. Храмини – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Ответственный редактор:

Е.А. Панова – доц., канд. техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Секция теории и практики автоматизированного электропривода:

А.С. Сарваров – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

А.Е. Козярук – проф., д-р техн. наук,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия;

О.А. Кравченко – проф., д-р техн. наук,
Тульский государственный университет,
г. Тула, Россия.

Секция электро- и теплоэнергетики:

А.В. Паздерин – проф., д-р техн. наук,
УрФУ им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

Е.Г. Нешпоренко – доц., канд. техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Н.Ф. Джазаров – проф., д-р техн. наук,
Высшее военно-морское училище
им. Николая Вапцарова, г. Варны, Болгария.

Секция энерго- и ресурсосбережения:

Р.Г. Мугалимов – доц., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

О.И. Осипов – проф., д-р техн. наук,
НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия;

В.Н. Мещеряков – проф., д-р техн. наук, ЛГТУ,
г. Липецк, Россия.

Секция электроснабжения:

Г.П. Корнилов – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

И.Ю. Андриюшин – канд. техн. наук,
ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Секции промышленной электроники, автоматики и систем управления; информационного, математического и программного обеспечения технических систем:

О.С. Логунова – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

С.М. Андреев – доц., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Е.Н. Ишиметьев – д-р техн. наук,
R&D МГТУ, г. Магнитогорск, Россия.

Секция электротехнологий в промышленности:

А.М. Зюзев – доц., д-р техн. наук,
УрФУ им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

А.Л. Карякин – с.н.с., д-р техн. наук,
УГГУ, г. Екатеринбург, Россия;

И.В. Бочкарев – проф., д-р техн. наук,
Кыргызский государственный технический
университет им. И. Раззакова, г. Бишкек,
Кыргызстан.

Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

А.С. Карандаев – проф., д-р техн. наук,
ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия;

И.М. Ячиков – проф., д-р техн. наук,
ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия.

Технические редакторы:

Н.П. Боярова – МГТУ им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия;

Е.А. Храмина – МГТУ им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2021

Подписной индекс издания 45083 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-58181 от 29 мая 2014 г.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.10.

Адрес редакции:

455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, д. 38, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
e-mail: ecis.red@gmail.com

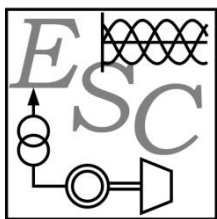
Адрес издателя:

МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, Челябинская обл.,
г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр.

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/1,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
участок оперативной полиграфии.

Выход в свет 24.12.2021. Заказ 300. Тираж 500 экз.
Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 4(53), DEC, 2021

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific issues publishing main results of Ph.D. thesis in Engineering Science, doctoral thesis, and in the database of Russian Scientific Citation Index (RSCI).

Editorial Board

Head of the Editorial Board:

S.I. Luk'yanov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Editor in Chief:

V.R. Khramshin – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Executive Editor:

E.A. Panova – Associate Professor, Ph.D.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Section of Theory and Practice of Automated Electric Drive:

A.S. Sarvarov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

A.E. Kozyaruk – Professor, D.Sc. (Engineering),
St. Petersburg Mining University, St. Petersburg,
Russia;

O.A. Kravchenko – Professor, D.Sc. (Engineering),
Tula State University, Tula, Russia.

Section of Power Engineering:

A.V. Pazderin – Professor, D.Sc. (Engineering),
UrFU named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia;

E.G. Neshporenko – Associate Professor, Ph.D.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

N.F. Dzhagarov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NVNA, Varna, Bulgaria.

Section of Energy- and Resources-Economy:

R.G. Mugalimov – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

O.I. Osipov – Professor, D.Sc. (Engineering),
MPEI, Moscow, Russia;

V.N. Meshcheryakov – Professor, D.Sc.
(Engineering), LSTU, Lipetsk, Russia.

Section of Electric Power Supply:

G.P. Kornilov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

I.Yu. Andryushin – Ph.D. (Engineering),
MMK PJSC, Magnitogorsk, Russia.

Section of Power Electronics, Automation and Control Systems; Technical Systems Dataware and Software:

O.S. Logunova – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

S.M. Andreev – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

E.N. Ishmet'ev – D.Sc. (Engineering),
of R&D NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Section of Industrial Electro Technology:

A.M. Zyuzev – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), UrFU named after the first
President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia;

A.L. Karyakin – Senior Research Associate, D.Sc.
(Engineering), UFMU, Ekaterinburg, Russia;

I.V. Bochkarev – Professor, D.Sc. (Engineering),
KSTU, Bishkek, Kyrgyzstan.

Section of Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment:

A.S. Karandaev – Professor, D.Sc. (Engineering),
SUSU (NRU), Chelyabinsk, Russia;

I.M. Yachikov – Professor, D.Sc. (Engineering),
SUSU (NRU), Chelyabinsk, Russia.

Technical Editors:

N.P. Boyarova – NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

E.A. Khramshina – NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

© FSBEI HE NMSTU, 2021

The subscription index of the journal is 45083 in the «Pressa Rossii» union catalog, vol. 1.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor).

Registration certificate PI No. FS77-58181 on May 29, 2014.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)

16+ in accordance with Federal Law no. 436-FZ dated 29.12.10

The publisher:

Nosov Magnitogorsk State Technical University
455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
NMSTU publishing center

The editorial office:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University
e-mail: ecis.red@gmail.com

The printing-office:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University, printing section

Publication date: 24.12.2021. Order 300. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА.....	4
<i>Сенюк М.Д., Дмитриева А.А., Дмитриев С.А.</i> Исследование характеристик метода экспресс-оценки параметров электрического режима в стационарных и динамических процессах.....	4
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	13
<i>Шандарова Е.Б., Букреев В.Г., Быстров Е.А.</i> Имитационное моделирование асинхронного электропривода насоса погружного технологического оборудования	13
<i>Климаш В.С., Петухов А.В.</i> Электротехнический деревообрабатывающий комплекс с улучшенной энергоэффективностью и производительностью.....	19
<i>Одинцов К.Э., Петушков М.Ю., Иванов Е.Ф., Бочкарев А.А., Лыгин М.М.</i> Способы повышения надежности ответственных электроприводов заводских электростанций металлургических производств	28
МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	33
<i>Волчанина М.А., Кузнецов А.А., Горлов А.В.</i> Повышение достоверности диагностирования силовых трансформаторов в условиях сезонных изменений температуры.....	33
<i>Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмушин В.Р.</i> Электродно-индуктивный вибродатчик с емкостной связью.....	39
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	50
<i>Дунаев М.П., Довудов С.У.</i> Сравнение энергоэффективности схем автономных инверторов напряжения с синусоидальной широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляцией.....	50
<i>Валиуллин К.Р.</i> Исследование резонансных явлений в цепях со светодиодными светильниками	56
<i>Николаев А.А., Гилемов И.Г., Малахов О.С.</i> Исследование усовершенствованной системы управления активных выпрямителей преобразователей частоты в составе электроприводов клетей прокатного стана	62
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ	69
<i>Варганова А.В.</i> Комплексная модель системы электроснабжения с источниками малой генерации	69
<i>Панова Е.А.</i> Учет емкостной проводимости несимметричной одноцепной ЛЭП с грозотросами	72
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	76

CONTENT

POWER ENGINEERING	4
<i>Senyuk M.D., Dmitrieva A.A., Dmitriev S.A.</i> Characteristics of Quick Estimation Method for Electric Mode in Stationary and Dynamic Processes	4
THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE.....	13
<i>Shandarova E.B., Bukreev V.G., Bystrov E.A.</i> Simulation Modeling of Induction Motor Drive of a Submersible Technological Equipment Pump	13
<i>Klimash V.S., Petukhov A.V.</i> Electrical Wood-Working Complex with Improved Energy Efficiency and Productive Rate.....	19
<i>Odintsov K.E., Petushkov M.Yu., Ivanov E.F., Bochkarev A.A., Lygin M.M.</i> Improving the Critical Electric Drives Reliability at Industrial Power Plants of Metallurgical Enterprises	28
MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT.....	33
<i>Volchanina M.A., Kuznetsov A.A., Gorlov A.V.</i> Increasing the Reliability of Power Transformers Diagnosing under Seasonal Temperature Changes.....	33
<i>Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R.</i> Electrode Inductive Vibration Sensor with Capacitance Coupling.....	39
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS	50
<i>Dunaev M.P., Dovudov S.U.</i> Energy Efficiency Comparison of Autonomous Voltage Inverter Circuits with Sinusoidal Pulse-Latest and Frequency-Pulse Modulation.....	50
<i>Valiullin K.R.</i> Research of Resonance in Circuits with Led Lamps.....	56
<i>Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Malakhov O.S.</i> Improved Control System Analysis of Frequency Converters Active Rectifiers as a Part of Rolling Mill Electric Drives.....	62
BRIEF COMMUNICATION.....	69
<i>Varganova A.V.</i> Integrated Model of a Power Supply System with Distributed Generation	69
<i>Panova E.A.</i> Introduction of The Capacitive Conductivity of a Non- Symmetric Single-Circuit Line with Ground Wire ...	72
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	76

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДА ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА В СТАЦИОНАРНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

На сегодняшний день в электроэнергетических системах наблюдается общая тенденция к цифровизации, изменению механизмов функционирования рынков электроэнергии и мощности и переход на низкоуглеродные возобновляемые источники энергии. Подобная трансформация энергосистем приведёт к снижению суммарной инерции, запасов устойчивости по межсистемным сечениям и увеличению нерегулярной составляющей перетоков активной мощности. Особенности энергосистем после завершения трансформации будут связаны с увеличением вероятности возникновения нерасчётных режимов и снижению корректности законов противоаварийного управления. Данные изменения потребуют коррекции методов работы традиционных систем противоаварийного управления в части быстродействия пусковых органов. В результате повышается актуальность задачи противоаварийного управления режимами энергосистем в темпе протекания электромеханического переходного процесса. Подобное управление предъявляет высокие требования к быстродействию и точности оценки параметров электрического режима. Работа посвящена исследованию характеристик и возможности применения метода экспресс-оценки параметров электрического режима в стационарных и динамических режимах изменения входного сигнала. Метод экспресс-оценки параметров электрического режима основан на аппроксимации сигнала на скользящих окнах с помощью многопараметрической модели, которая обладает высокой устойчивостью и надёжностью. В качестве исходных данных использованы смоделированные сигналы в *Matlab/Simulink*. Для численных экспериментов рассмотрена одномашинная модель тестовой энергосистемы, включающая модели синхронного генератора, паровой турбины, автоматического регулятора возбуждения сильного действия, регулятора скорости вращения турбины, линий электропередачи и шин бесконечной мощности. В результате экспериментов были получены приемлемые характеристики экспресс-метода оценки параметров электрического режима.

Ключевые слова: синхронизированные векторные измерения, полная ошибка определения вектора, математическое моделирование, цифровая обработка сигналов, электроэнергетическая система.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день общий вектор развития электроэнергетических систем (ЭЭС) связан с цифровизацией отрасли, переходом к низкоуглеродным источникам энергии, изменением механизмов функционирования рынков электроэнергии и мощности, внедрением инструментов ценозависимого потребления, разработкой и внедрением интеллектуальных методов оценки технического состояния силового оборудования. Изменения в структуре и режимах работы ЭЭС направлены на повышение экономической эффективности, снижение выбросов отходов горения углеродсодержащего топлива, повышение наблюдаемости и управляемости. С другой стороны, изменения, происходящие в энергосистемах, могут иметь и отрицательное влияние. В **табл. 1** приведён анализ современных направлений развития ЭЭС.

Современные направления развития ЭЭС приводят к снижению общей инерции и увеличению перетоков активной мощности по межсистемным сечениям, что приводит к увеличению вероятности возникновения нерасчётных режимов для противоаварийной автоматики (ПА). Кроме того, уменьшение суммарной инерции энергосистем приводит к увеличению скорости протекания переходных процессов и необходимости разработки ПА по способу «После» [1], а также к оценке и определению параметров электромеханической фазы переходного процесса с минимальными алгоритмическими задержками. На сего-

дняшний день существует ряд методов оценки параметров электрического режима (ПЭР), которые могут быть использованы в алгоритмах пусковых органов ПА. Алгоритмы оценки ПЭР отличаются по математическому ядру, точности, временным задержкам и сферами применения.

Для всех описанных направлений развития ЭЭС могут быть выделены особенности, которые приводят к необходимости развития методов оценки ПЭР.

Таблица 1
Анализ направлений развития ЭЭС

Направление	Цель	Особенности
Внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ)	Снижение общего количества выбросов отходов горения углеродсодержащего топлива в атмосферу	Снижение суммарной инерции энергосистем, увеличение неопределённости режимов энергосистем
Внедрение ценозависимого потребления электроэнергии	Увеличение надёжности энергосистем	Увеличение неопределённости режимов энергосистем
Переход к планированию режимов с использованием системы мониторинга запасов устойчивости	Увеличение экономической эффективности работы энергосистем, снижение объёма «запертой» мощности	Снижение запасов устойчивости по межсистемным сечениям

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О синхронизированных
ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Первые работы по разработке устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ) были выполнены в политехническом университете Виргинии в 80-е годы XX века [2] при поддержке Правительства США и национального научного фонда США.

Активное развитие вычислительной техники в 1960-1980 годах в США привело к разработке и реализации алгоритмов цифровых защит энергосистем, в том числе дифференциальной защиты линий. Принципиально новым подходом в построении подобных защит было использование сигналов прямой, обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений защищаемого участка. Одним из результатов разработки цифровых защит стал метод вычисления симметричных составляющих с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

Следующей задачей на пути к первому промышленному УСВИ стало обеспечение синхронизации измерений на подстанциях, находящихся за несколько десятков километров друга от друга. Точная синхронизация измерений стала возможна с появлением системы глобального позиционирования (GPS). Хотя точность первых GPS была относительно невысокой, её было достаточно для построения первых образцов УСВИ.

В 1988 году был разработан первый промышленный прототип УСВИ. Последующие работы были направлены на разработку инфраструктурных решений хранения и обработки информации от УСВИ, теоретические подходы использования УСВИ, развитие методов оценки ПЭР. Одними из первых сфер применения УСВИ стали задачи оценивания состояния энергосистем и мониторинга режима энергосистем.

В настоящее время под синхронизированными векторными измерениями понимается совокупность векторных ПЭР (действующие значения и фазы токов и напряжений, значения частот, значение скорости изменения частоты), измеренных с заранее заданной дискретизацией по времени и уровню и определённой точностью, синхронизированных по времени с помощью системы глобального позиционирования [1].

На рис. 1 приведена иллюстрация, поясняющая принцип синхронизированных векторных измерений (СВИ).

С помощью системы глобального позиционирования (на рис. 1 – спутник) всем измерениям, полученным с помощью УСВИ, присваивается единая метка времени, т.е. происходит их синхронизация. УСВИ позволяют представить мгновенный сигнал тока или напряжения в векторном виде, т.е. выделить из первичного сигнала амплитуду и фазу, как показано на рис. 2.

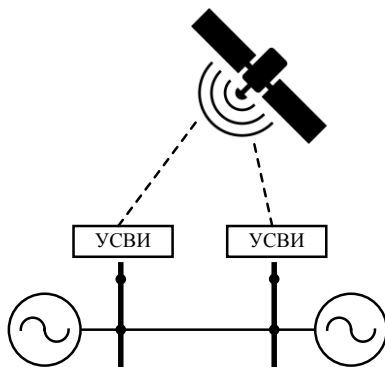


Рис. 1. Иллюстрация, поясняющая принцип СВИ

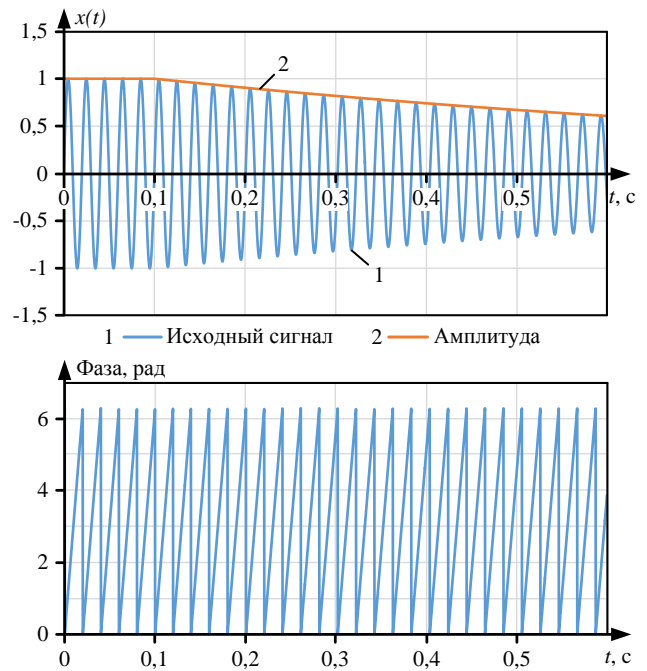


Рис. 2. Пример представления сигнала в векторном виде

Применение УСВИ позволяет решить ряд задач, недоступных для традиционных средств измерений [1]:

- определение сдвига по фазе между точками ЭЭС с установленными УСВИ;
- анализ низкочастотных колебаний (НЧК) групп синхронных генераторов (СГ);
- мониторинг запасов статической устойчивости ЭЭС;
- мониторинг технического состояния оборудования;
- мониторинг токов нагрузок элементов ЭЭС и уровней напряжений в контрольных пунктах;
- мониторинг корректности работы регуляторов автоматического возбуждения (АРВ) СГ;
- уточнение параметров математических моделей силового оборудования;
- противоаварийное и режимное управление ЭЭС.

Перед внедрением все УСВИ проходят аттестацию на заранее подготовленных тестовых сигналах с известными законами изменения и заданными допустимыми погрешностями оценки параметров сигналов. Для подобных испытаний используются цифровые системы моделирования в реальном времени [1], для которых используется заранее подготовленная математическая модель ЭЭС.

ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА

На современном этапе развития энергосистем УСВИ [2] являются одним из основных инструментов для мониторинга, анализа и управления режимами как крупных энергообъединений, так и изолированных энергосистем [3]. УСВИ находят широкое применение в сетях высокого и сверхвысокого напряжения Китая (более 2500 УСВИ [4]), США (более 2000 УСВИ [5]), Российской Федерации (более 700 УСВИ)

и обеспечивают цифровую обработку мгновенных значений сигналов напряжений и токов, которая заключается в представлении сигнала в векторной форме (выделение амплитуды и фазы), определении частоты и её производной по времени.

Существующие алгоритмы оценки ПЭР в общем случае можно разделить на два типа: алгоритмы в частотной и временной области. Большинство алгоритмов оценки ПЭР в частотной области основаны на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) [6-13]. Основным недостатком алгоритмов, основанных на ДПФ, связан с невозможностью точной оценки ПЭР в динамических условиях, сопровождающихся модуляцией частоты и амплитуды сигнала, поэтому для динамических условий были разработаны алгоритмы динамической оценки [10] и интерполяционного динамического ДПФ [11].

Для алгоритмов оценки ПЭР во временной области используются метод взвешенных наименьших квадратов (МНК) и его вариации [14, 15], фильтр Калмана [16], рекурсивные алгоритмы [17], а также модель амплитудной и фазовой модуляции [18]. Данные методы основаны на статическом или динамическом представлении исходного сигнала. Для определения ПЭР был использован временно-частотный подход Вейвлет-преобразования [19].

Алгоритмы оценки ПЭР, основанные на ДПФ, применяются в промышленных УСВИ, вычислительная задержка которых превышает период промышленной частоты. Фильтр Калмана нашёл широкое применение для решения задачи оценивания состояния режима ЭЭС, однако ряд его недостатков делает его применение затруднительным для оценки ПЭР [20] в режиме реального времени.

В табл. 2 приведён перечень алгоритмов оценки ПЭР в зависимости от рассматриваемого процесса.

Несмотря на эффективность и распространённость приведённых методов оценки ПЭР, существует ряд проблем при их использовании: задержки рассмотренных алгоритмов обычно составляют от одного до нескольких периодов промышленной частоты, отсутствие отстройки от увеличения погрешности в момент возмущения, недостаточная адаптивность к режимам со значительным изменением частоты. Задачей работы является исследование характеристик и возможности применения метода экспресс-оценки параметров электрического режима в стационарных и динамических режимах изменения входного сигнала.

Таблица 2

Перечень алгоритмов оценки ПЭР

Область получения результатов оценки	Стационарный процесс	Динамический процесс
Частотная	ДПФ	Интерполяционное ДПФ
Временная	МНК, фильтр Калмана, рекурсивные алгоритмы, метод Прони	
Частотно-временная	Вейвлет-преобразование	

Разработанный метод экспресс-оценки ПЭР [21] основан на аппроксимации сигнала первыми членами ряда Фурье на скользящих окнах с помощью многопараметрической модели (МПП) [22]:

$$x(t) = a_0(t) + a(t)\sin(\omega t) + b(t)\cos(\omega t), \quad (1)$$

где $x(t)$ – значение сигнала тока или напряжения в момент времени t ; a_0 – постоянная составляющая сигнала; a, b – коэффициенты при первых членах ряда Фурье; ω – угловая базисная частота сигнала.

Для корректного вычисления амплитуд сигналов с аperiodической составляющей экспресс-метод оценки ПЭР позволяет определить аperiodическую составляющую сигнала с помощью вычисления коэффициента a_0 выражения (1). Использование многопараметрической модели позволяет найти коэффициенты аппроксимирующего полинома (1) с учётом вероятностного характера протекания процессов в ЭЭС [23], что позволяет увеличить надёжность разработанного метода при условии зашумлённости анализируемого сигнала. В условиях изменения частоты входного сигнала применяется адаптивная коррекция угловой базисной частоты в выражении (1). Алгоритм коррекции заключается в использовании прогнозного значения угловой частоты, которое получено путём аппроксимации полиномом второй степени вектора изменения угловых частот на предыдущих тактах расчёта.

По полученным коэффициентам выражения (1) значения амплитуды A и фазы сигнала φ определяются аналогично классическим методам разложения сигнала на ортогональные составляющие:

$$A(t) = a_0(t) + \sqrt{a(t)^2 + b(t)^2}; \quad (2)$$

$$\varphi(t) = \arcsin \frac{a(t)}{\sqrt{a(t)^2 + b(t)^2}}. \quad (3)$$

Мгновенная частота сигнала определяется путём численного дифференцирования сигнала фазы на скользящих окнах с помощью аппроксимации полиномом второй степени.

Для точности оценки ПЭР при отсутствии эталонных (заданных) значений сигнала разработан комплексный подход анализа отклонения исходного сигнала от восстановленного по выражению

$$x_{rec}(t) = A(t)\sin(\varphi(t)), \quad (4)$$

где $x_{rec}(t)$ – значение восстановленного сигнала в момент времени t ; $A(t)$ – амплитуда сигнала в момент времени t ; $\varphi(t)$ – значение фазового угла в момент времени t .

Относительная ошибка (ME) восстановления сигнала вычисляется следующим образом:

$$ME = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^N \frac{|x(t) - x_{rec}(t)|}{\max[x(t)]} \cdot 100\%, \quad (5)$$

Таблица 3

Параметры тестовой модели ЭЭС

Элемент	Параметры
Турбогенератор (ТГ)	$P_{ном} = 300$ МВт; $x_d = 610$ Ом; $x_d' = 186$ Ом; $x_d'' = 75$ Ом; $T_J = 4$ с
Турбина	$K_1 = 0,3$; $K_2 = 0,4$; $K_3 = 0,3$; $T_1 = 0,2$ с; $T_2 = 7,0$ с; $T_3 = 0,4$ с
Регулятор частоты вращения турбины	$\sigma = 4$ %; $T_g = 0,3$ с; $P_{СГMax} = 1,05$; $P_{СГMin} = 0,4$
Трансформатор (Т)	$x = 28,3$ Ом; $k_U = 11,5$ кВ / 330 кВ
Линии электропередачи (ЛЭП)	$r+jx = 2,75+j43,23$ Ом; $x_0 = 108,06$ Ом; $b = 444,3$ мСм
Шины бесконечной мощности (ШБМ)	$U = 330$ кВ

где ME – средняя относительная ошибка восстановления сигнала; N – количество измерений; $x(t)$ – значение исходного сигнала в момент времени t ; $x_{rec}(t)$ – значение восстановленного сигнала в момент времени t .

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В рамках численного эксперимента выполнено тестирование разработанного метода оценки ПЭР на сигналах, законы изменения которых приведены в стандарте [26], а также на сигнале переходного процесса, в *Matlab/Simulink* на одномашинной математической модели ЭЭС.

Точность оценки ПЭР согласно [24] определена с помощью вычисления общей ошибки вектора (TVE):

$$TVE = \sqrt{\frac{(X_r - x_r)^2 + (X_i - x_i)^2}{x_r^2 + x_i^2}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где X_r – действительная часть измеренного вектора; x_r – действительная часть истинного вектора; X_i – мнимая часть измеренного вектора; x_i – мнимая часть истинного вектора.

ОПИСАНИЕ ТЕСТОВОЙ СХЕМЫ

Для моделирования переходного процесса с произвольной траекторией изменения ПЭР использована одномашинная модель ЭЭС, реализованная в *Matlab/Simulink*. Тестовая модель включает паровую турбину, АРВ сильного действия, регулятор скорости вращения турбины. Используемая модель ЭЭС обладает некоторой избыточностью, направленной на дальнейшее развитие работы.

Топология модели представлена на рис. 3, а в табл. 3 приведены параметры модели. В качестве возмущения выбрано трёхфазное самоустраняющееся короткое замыкание (КЗ) длительностью 0,2 с. На рис. 3 красной стрелкой указано место возникновения КЗ.

В табл. 3 приняты следующие обозначения:

- σ – статизм регулятора частоты вращения турбины, %;
- T_g – постоянная времени регулятора, с;
- $P_{СГMax}$ – максимальная мощность СГ относительно номинальной, %;
- $P_{СГMin}$ – минимальная мощность СГ относительно номинальной, %;
- K_1, K_2, K_3 – составляющие механической мощности объемов высокого, среднего и низкого давления;
- T_1, T_2, T_3 – постоянная времени парового объема высокого давления, постоянная времени пароперегревателя, постоянная времени парораспределения и объема низкого давления, с.

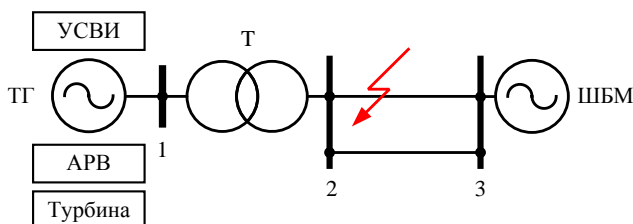


Рис. 3. Тестовая модель ЭЭС

Далее приведены результаты тестирования экспресс-метода оценки параметров электрического режима согласно выбранным сценариям из стандарта [24].

СТАЦИОНАРНЫЙ ПРОЦЕСС

На рис. 4 приведены графики исходного сигнала и результаты расчёта TVE .

На рис. 4–6 приняты обозначения: *Window* – минимальное расчётное окно, TVE_{max} – максимально допустимое значение TVE .

В качестве сигнала стационарного процесса сформирован синусоидальный сигнал с частотами дискретизации от 1 до 60 кГц, с частотой колебаний 50 Гц. С использованием выражения (6) получены зависимости TVE от величины расчётного окна и частоты дискретизации исходного сигнала. Для статического процесса допустимое значение TVE соответствует 1% [24].

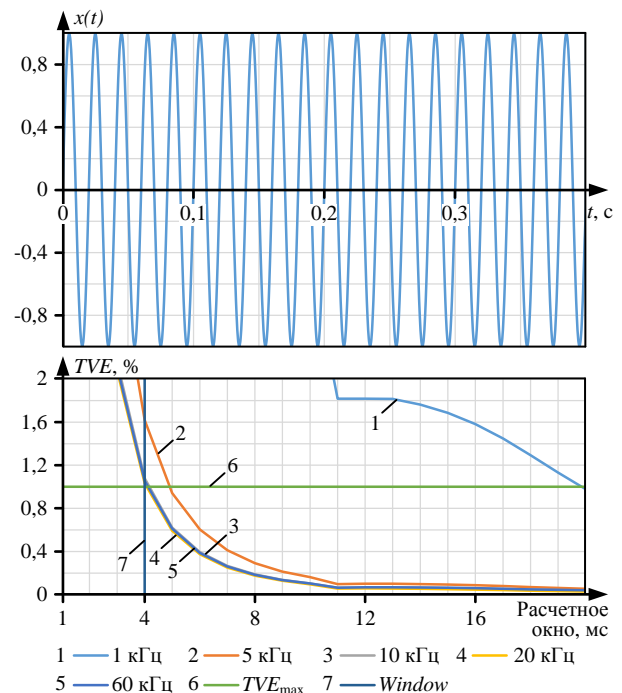


Рис. 4. Результаты расчёта, стационарный процесс

Для рассмотренного сигнала при всех частотах дискретизации требования стандарта [24] удовлетворены, начиная с величины расчётного окна 4 мс, при частоте дискретизации первичного сигнала выше 10 кГц практически отсутствует влияние на значение *TVE*.

ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС С МОДУЛЯЦИЕЙ АМПЛИТУДЫ

В качестве исходных данных рассмотрен набор синусоидальных сигналов с частотами дискретизации от 1 до 60 кГц, с заданным законом модуляции амплитуды при частоте модуляции 1,9 Гц.

$$x(t) = X_m [1 + 0,1 \cos(2f_m \pi t)] \cdot \cos[100\pi t], \quad (7)$$

где $x(t)$ – тестовый сигнал; $X_m = 57,73$; f_m – частота модуляции ($f_m = 1,9$ Гц).

Для динамического процесса допустимое значение *TVE* соответствует 3 % [24]. На рис. 5 приведены графики исходного сигнала и результаты расчёта *TVE*.

Для рассмотренного сигнала при всех частотах дискретизации требования стандарта [24] могут быть удовлетворены, начиная с величины расчётного окна 3 мс. Для рассмотренного теста, начиная с частоты дискретизации 10 кГц, практически отсутствует влияние на значение *TVE*.

ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС С ЛИНЕЙНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ

В качестве исходных данных рассмотрен набор синусоидальных сигналов с частотами дискретизации от 1 до 60 кГц, с линейным изменением частоты от 46 до 52 Гц при скорости изменения частоты 1 Гц/с. С использованием выражения (6) получены зависимости *TVE* от величины расчётного окна и частоты дискретизации исходного сигнала.

Для динамического процесса допустимое значение *TVE* соответствует 1 % [24]. На рис. 6 приведены графики частоты исходного сигнала и результаты расчёта *TVE*.

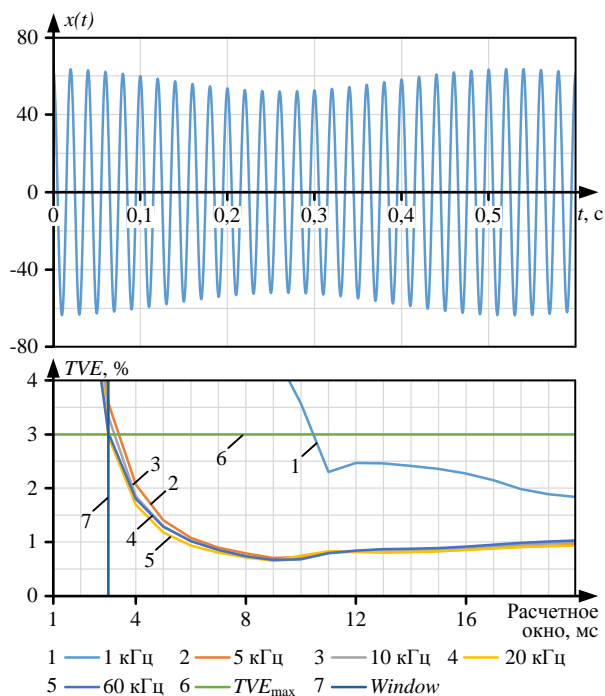


Рис. 5. Результаты расчёта, модуляция амплитуды

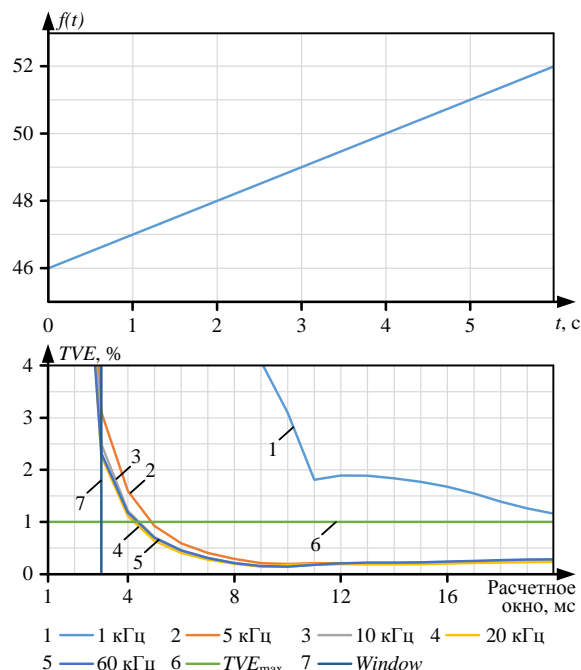


Рис. 6. Результаты расчёта, линейное изменение частоты

Для рассмотренного сигнала при всех частотах дискретизации требования стандарта [24] могут быть удовлетворены, начиная с величины расчётного окна 4 мс. Для рассмотренного теста, начиная с частоты дискретизации 10 кГц, практически отсутствует влияние на значение *TVE*.

ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС С НАЛИЧИЕМ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Для вычисления аperiodической составляющей рассмотрен сигнал с частотой дискретизации 10 кГц, приведённый на рис. 7. На рис. 8 изображены результаты вычисления аperiodической составляющей сигнала в зависимости от величины расчётного окна.

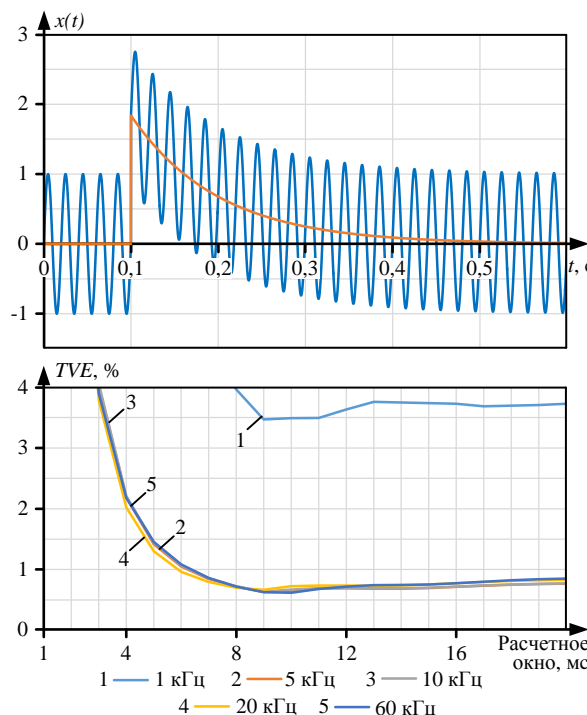


Рис. 7. Результаты расчёта, аperiodическая составляющая

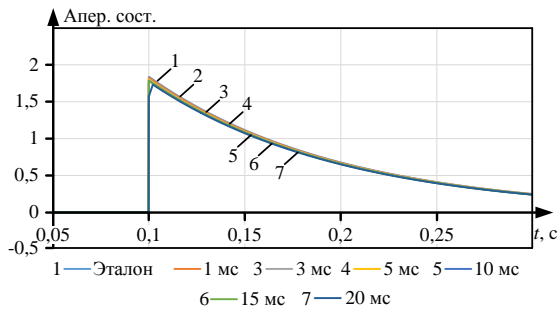


Рис. 8. Вычисленные значения аperiodической составляющей сигнала

Метод экспресс-оценки ПЭР позволяет определить аperiodическую составляющую с величиной расчётного окна от 1 мс, при ошибке менее 1%. Для рассмотренного сигнала приемлемая величина расчётного окна (10 мс) определялась по достижении установившегося значения TVE . В стандарте [24] отсутствует динамический тест при наличии аperiodической составляющей в рассматриваемом сигнале, поэтому на рис. 7 не показано TVE_{max} .

ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС В MATLAB/SIMULINK

Для моделирования сигнала переходного процесса была использована тестовая модель ЭЭС, схема которой приведена на рис. 3. Исходный сигнал переходного процесса и ME приведены на рис. 9. С использованием выражения (5) получены зависимости ME от величины расчётного окна и частоты дискретизации исходного сигнала для фрагмента сигнала после КЗ. Для рассмотренного сигнала значение ME устанавливается в пределах 1% при частотах дискретизации от 10 кГц и величине расчётного окна от 7 мс.

С целью проверки методики определения точности оценки ПЭР сопоставлены результаты вычисления TVE и ME исходного и восстановленного сигнала из опыта с динамическим сигналом при модуляции амплитуды. Результаты сопоставления TVE и ME , среднеквадратическое отклонение (СКО) и математическое ожидание (МО) разности исходного и восстановленного сигналов при величине расчётного окна 5 мс приведены на рис. 10.

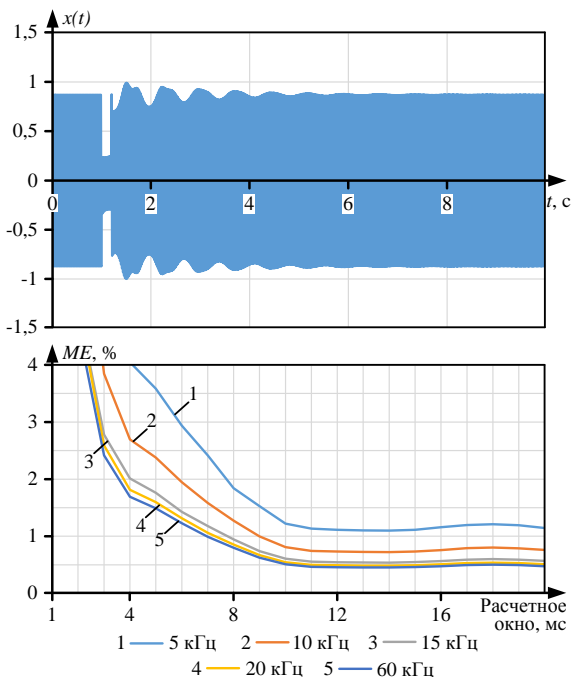


Рис. 9. Результаты расчёта, произвольный переходный процесс

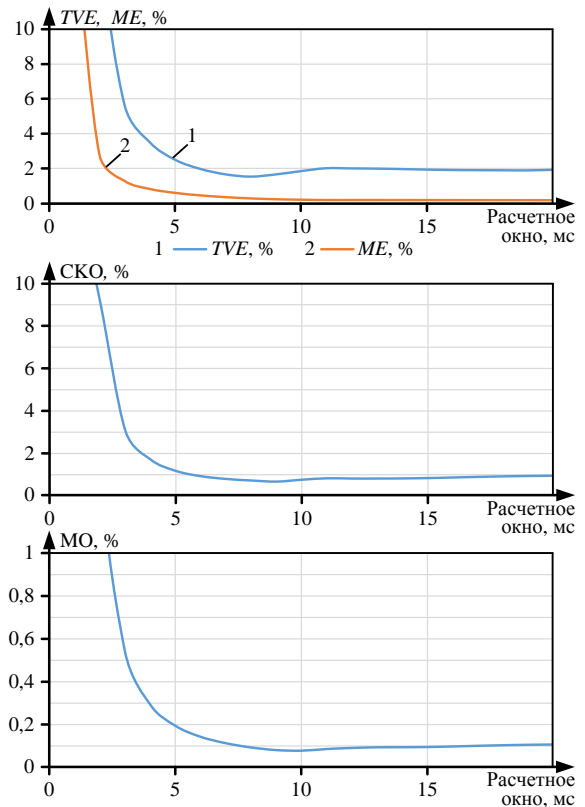


Рис. 10. Сравнение TVE и ME для расчётного окна 5 мс

Качественно значения TVE и ME , полученные для стационарного сигнала, являются схожими в части установления практически неизменных значений TVE и ME . Аналогичные результаты могут быть получены для сигналов динамических процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведено исследование характеристик метода экспресс-оценки параметров электрического режима на смоделированных в *Matlab/Simulink* данных.

Метод экспресс-оценки параметров электрического режима позволяет оценить параметры динамического процесса с вычислительными задержками от 3 до 5 мс, при частоте первичных измерений от 10 кГц и более. В работе показана эффективность предложенной методики анализа точности оценки ПЭР для сигналов с неизвестными эталонными параметрами изменения через вычисление ME разности исходного сигнала и восстановленного по выражению (4). Метод экспресс-оценки ПЭР может быть использован для вычисления аperiodической составляющей сигнала. Для смоделированного сигнала предложенный метод позволяет определить аperiodическую составляющую с величиной расчётного окна от 1 мс при ошибке менее 1%. Разработанный метод оценки ПЭР может быть использован в алгоритмах пусковых органов ПА, системах диагностики технического состояния синхронных машин, регистраторах динамических переходных процессов. Дальнейшие исследования будут направлены на апробацию метода экспресс-оценки параметров электрического режима на физических данных на электродинамической модели.

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору Бердину Александру Сергеевичу за научное консультирование и участие в обсуждениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavella M., Ernst D., Ruiz-Vega D. Transient stability of power systems: a unified approach to assessment and control. Springer Science & Business Media, 2012. 254 p.
2. Phadke A.G. Synchronized phasor measurements—a historical overview // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. IEEE, 2002. Pp. 476-479. doi: 10.1109/TDC.2002.1178427
3. Phadke A.G., T. Bi. Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2018. Vol. 6. Pp. 619-629. doi: 10.1007/s40565-018-0423-3
4. Advancing China's smart grid: Phasor measurement units in a wide-area management system / C. Lu, B. Shi, X. Wu, H. Sun // IEEE Power Energy Magazine. 2015. No. 5. Pp. 60-71. doi: 10.1109/MPE.2015.2432372
5. A fast and accurate PMU algorithm for P+M class measurement of synchrophasor and frequency / P. Castello, J. Liu, C. Muscas, P. A. Pegoraro, F. Ponci, A. Monti // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014. No. 12. Pp. 2837-2845. doi: 10.1109/TIM.2014.2323137
6. Macii D., Petri D., Zorat A. Accuracy analysis and enhancement of DFT-based synchrophasor estimators in off-nominal conditions // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2012. Vol. 61. Pp. 2653-2664. doi: 10.1109/TIM.2012.2199197
7. Belega D., Petri D. Accuracy analysis of the multicycle synchrophasor estimator provided by the interpolated DFT algorithm // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2013. Vol. 62. Pp. 942-953. doi: 10.1109/TIM.2012.2236777
8. Romano P., Paolone M. Enhanced interpolated-DFT for synchrophasor estimation in FPGAs: Theory, implementation, and validation of a PMU prototype // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014. Vol. 63. Pp. 2824-2836. doi: 10.1109/TIM.2014.2321463
9. Premerlani W., Kasztenny B., Adamiak M. Development and implementation of a synchrophasor estimator capable of measurements under dynamic conditions // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. Vol. 23. Pp. 109-123. doi: 10.1109/TPWRD.2007.910982
10. A dynamic synchrophasor estimation algorithm for online application / R.K. Mai, Z.Y. He, L. Fu, B. Kirby, Z.Q. Bo // IEEE Transactions on Power Delivery. 2010. Vol. 25(2). Pp. 570-578. doi: 10.1109/TPWRD.2009.2034293
11. Petri D., Fontanelli D., Macii D. A frequency-domain algorithm for dynamic synchrophasor and frequency estimation // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014. Vol. 63(10). Pp. 2330-2340. doi: 10.1109/TIM.2014.2308996
12. Dynamic single-phase synchronized phase and frequency estimation at the distribution level / L. Zhan, Y. Liu, J. Culliss, J. Zhao, Y. Liu // IEEE Transactions on Smart Grid. 2015. Vol. 6(4). Pp. 2013-2022. doi: 10.1109/TSG.2015.2400973
13. Zhan L., Liu Y., Liu Y. A Clarke transformation-based DFT phasor and frequency algorithm for wide frequency range // IEEE Transactions on Smart Grid. 2018. Vol. 9. Pp. 67-77. doi: 10.1109/TSG.2016.2544947
14. J.A. de la O Serna Dynamic phasor estimates for power system oscillations // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2007. Vol. 56(5). Pp. 1648-1657. doi: 10.1109/TIM.2007.904546
15. Platas-Garza M.A., Platas-Garza J., J.A. de la O Serna. Dynamic phasor and frequency estimates through maximally flat differentiators // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2010. Vol. 59(7). Pp. 1803-1811. doi: 10.1109/TIM.2009.2030921
16. Huang C., Xie X., Jiang H. Dynamic phasor estimation through DSTKF under transient conditions // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2017. Vol. 66(11). Pp. 2929-2936. doi: 10.1109/TIM.2017.2713018
17. Sadinezhad I., Agelidis V.G. Real-time power system phasors and harmonics estimation using a new decoupled recursive-least-squares technique for DSP implementation // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Vol. 60(6). Pp. 2295-2308. doi: 10.1109/TIE.2012.2192895
18. Vejdan S., Sanaye-Pasand M., Malik O.P. Accurate dynamic phasor estimation based on the signal model under off-nominal frequency and oscillations // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. Vol. 8(2). Pp. 708-719. doi: 10.1109/TSG.2015.2503742
19. Chauhan K., Reddy M.V., Sodhi R. A novel distribution-level phasor estimation algorithm using empirical wavelet transform // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65(10). Pp. 7984-7995. doi: 10.1109/TIE.2018.2801837.
20. Jin T., Zhang W. A novel interpolated DFT synchrophasor estimation algorithm with an optimized combined cosine self-convolution window // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2021. Vol. 70. Pp. 1-10. doi: 10.1109/TIM.2020.3033073
21. Kovalenko P.Y., Senyuk M.D., Dmitrieva A.A. Determination of the instantaneous electrical operating parameters with an increased sampling rate // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. IEEE, 2020. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278482
22. Бердин А.С., Крючков П.А. Формирование параметров модели ЭЭС для управления электрическими режимами. Екатеринбург: УГТУ, 2000. 107 с.
23. Бердин А.С., Близнюк Д.И., Романов И.Б. Определение результирующих характеристик нагрузки энергорайонов для выполнения расчетов электромеханических переходных процессов // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2016. № 1(74). С. 35.
24. IEEE Std C37.118. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. 2011. Pp. 1-61. doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6111219

Поступила в редакцию 13 сентября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CHARACTERISTICS OF QUICK ESTIMATION METHOD FOR ELECTRIC MODE IN STATIONARY AND DYNAMIC PROCESSES

Mikhail D. Senyuk

Postgraduate Student, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, mdsenuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5589-7922>

Anna A. Dmitrieva

Postgraduate Student, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, anyaprox@gmail.com.

Stepan A. Dmitriev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, dmstepan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8781-2383>

At present, there is a general trend towards digitalization in electric power systems, a change in the principles of electricity and capacity market mechanisms and increasing penetration of low-carbon renewable energy sources. Such a transformation of power systems will lead to a decrease in the total inertia, stability margins and an increase in the irregular component of active power flows. Features of power systems after the transformation completion will be associated with an increase in the likelihood of the occurrence of non-design modes and a decrease of the emergency control laws correctness. These changes will require correction in traditional emergency control operation principle in terms of the fault detector speed. As a result, the importance of power system emergency control problem during the electromechanical transient process is increasing. Such an emergency control principle has a high requirement for the speed and accuracy of electric mode parameter estimation. The work is devoted to the study of electrical mode parameters express-estimation characteristics and the possibility of its applying in stationary conditions and the dynamic change of the input signal. The method of electrical mode parameters express-estimation is based on the signal approximation using a multi-parameter model, which is highly stable and reliable. The mathematically modeled signals in Matlab/Simulink were used as the initial data. A single-machine model of a test power system was used for the case study, taking into account the models of a synchronous generator, a steam turbine, an automatic voltage regulator, a turbine speed regulator, power lines and infinite bus. Because of the experiments, acceptable characteristics of express-method of electric mode parameters evaluation were obtained.

Keywords: phasor measurement unit, total vector error, mathematical modeling, digital signal processing, electrical power system.

REFERENCES

- Pavella M., Ernst D., Ruiz-Vega D. Transient stability of power systems: a unified approach to assessment and control. Springer Science & Business Media, 2012. 254 p.
- Phadke A.G. Synchronized phasor measurements—a historical overview. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. IEEE. 2002, pp. 476–479. doi: 10.1109/TDC.2002.1178427
- Phadke A.G., Bi T. Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2018, vol. 6, pp. 619–629. doi: 10.1007/s40565-018-0423-3
- Lu C., Shi B., Wu X., Sun H. Advancing China’s smart grid: Phasor measurement units in a wide-area management system. IEEE Power Energy Magazine. 2015, no. 5, pp. 60–71. doi: 10.1109/MPE.2015.2432372
- Castello P., Liu J., Muscas C., Pegoraro P.A., Ponci F. A. Monti A Fast and Accurate PMU Algorithm for P+M Class Measurement of Synchrophasor and Frequency. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014, no. 12, pp. 2837–2845. doi: 10.1109/TIM.2014.2323137
- Macii D., Petri D., Zorat A. Accuracy analysis and enhancement of DFT-based synchrophasor estimators in off-nominal conditions. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2012, vol. 61, pp. 2653–2664. doi: 10.1109/TIM.2012.2199197
- Belega D., Petri D. Accuracy analysis of the multicycle synchrophasor estimator provided by the interpolated DFT algorithm. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2013, vol. 62, pp. 942–953. doi: 10.1109/TIM.2012.2236777
- Romano P., Paolone M. Enhanced interpolated-DFT for synchrophasor estimation in FPGAs: Theory, implementation, and validation of a PMU prototype. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014, vol. 63, pp. 2824–2836. doi: 10.1109/TIM.2014.2321463
- Premerlani W., Kasztenny B., Adamiak M. Development and implementation of a synchrophasor estimator capable of measurements under dynamic conditions. IEEE Transactions on Power Delivery. 2008, vol. 23, pp. 109–123. doi: 10.1109/TPWRD.2007.910982
- Mai R.K., He Z.Y., Fu L., Kirby B., Bo Z.Q. A dynamic synchrophasor estimation algorithm for online application. IEEE Transactions on Power Delivery. 2010, vol. 25, pp. 570–578. doi: 10.1109/TPWRD.2009.2034293
- Petri D., Fontanelli D., Macii D. A frequency-domain algorithm for dynamic synchrophasor and frequency estimation. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014, vol. 63, pp. 2330–2340. doi: 10.1109/TIM.2014.2308996
- Zhan L., Liu Y., Culliss J., Zhao J., Liu Y. Dynamic single-phase synchronized phase and frequency estimation at the distribution level. IEEE Transactions on Smart Grid. 2015, vol. 6, pp. 2013–2022. doi: 10.1109/TSG.2015.2400973
- Zhan L., Liu Y., Liu Y. A Clarke transformation-based DFT phasor and frequency algorithm for wide frequency range. IEEE Transactions on Smart Grid. 2018, vol. 8, pp. 67–77. doi: 10.1109/TSG.2016.2544947
- De la O Serna J.A. Dynamic phasor estimates for power system oscillations. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2007, vol. 56, pp. 1648–1657. doi: 10.1109/TIM.2007.904546
- Platas-Garza M.A., Platas-Garza J., De la O Serna J.A. Dynamic phasor and frequency estimates through maximally flat differentiators. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2010, vol. 59, pp. 1803–1811. doi: 10.1109/TIM.2009.2030921
- Huang C., Xie X., Jiang H. Dynamic phasor estimation through DSTKF under transient conditions. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2017, vol. 66, pp. 2929–2936. doi: 10.1109/TIM.2017.2713018
- Sadinezhad I., Agelidis V.G. Real-time power system phasors and harmonics estimation using a new decoupled recursive-least-squares technique for DSP implementation. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013, vol. 60, pp. 2295–2308. doi: 10.1109/TIE.2012.2192895.
- Vejdan S., Sanaye-Pasand M., Malik O.P. Malik. Accurate dynamic phasor estimation based on the signal model under off-nominal frequency and oscillations. IEEE Transactions on Smart Grid. 2017, vol. 8, pp. 708–719. doi: 10.1109/TSG.2015.2503742
- Chauhan K., Reddy M.V., Sodhi R. A novel distribution-level phasor estimation algorithm using empirical wavelet transform. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018, vol. 65, pp. 7984–7995. doi: 10.1109/TIE.2018.2801837
- Jin T., Zhang W. A Novel Interpolated DFT Synchrophasor Estimation Algorithm With an Optimized Combined Cosine Self-Convolution Window. IEEE Transactions on Instru-

- mentation and Measurement. 2021, vol. 70, pp. 1-10. doi: 10.1109/TIM.2020.3033073
21. Kovalenko P.Y., Senyuk M.D., Dmitrieva A.A. Determination of The Instantaneous Electrical Operating Parameters With an Increased Sampling Rate/ 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. IEEE. 2020, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278482
22. Berdin A. S., Kryuchkov P. A. *Formirovanie parametrov modeli EES dlya upravleniya elektricheskimi rezhimami* [Formation of electrical power system model parameters for electric mode control]. Ekaterinburg, UGTU Publ., 2000. 107 p. (in Russian)
23. Berdin A. S., Bliznyuk D. I., Romanov I. B. Calculation of resultant load characteristics for power districts to calculate electrical and mechanical transient processes. *Izvestiya NTTS Edinoy energeticheskoy sistemy* [STC of Unified Power System Proceedings], 2016, no. 1, 35 p. (in Russian)
24. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. IEEE Std C37.118, 2011, pp. 1-61. doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6111219
-

Сенюк М.Д., Дмитриева А.А., Дмитриев С.А. Исследование характеристик метода экспресс-оценки параметров электрического режима в стационарных и динамических процессах // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 4-12. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-4-12](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-4-12)

Senyuk M.D., Dmitrieva A.A., Dmitriev S.A. Characteristics of Quick Estimation Method for Electric Mode in Stationary and Dynamic Processes. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 4-12. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-4-12](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-4-12)

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.314.58:681.515

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-13-18)

Шандарова Е.Б., Букреев В.Г., Быстров Е.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА ПОГРУЖНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Статья посвящена моделированию асинхронного электропривода (АЭП) погружного центробежного насоса, используемого в составе нефтегазового технологического оборудования и установок подводных аппаратов. Исследуемая электротехническая система включает источник энергии, автономный инвертор напряжения (АИН), кабельную линию и LC-фильтры на выходе АИН, питающего асинхронный двигатель (АД). Невозможность непосредственного измерения частоты вращения АД предопределяет разомкнутый принцип построения системы управления АЭП. Созданная имитационная модель электропривода обеспечивает анализ его статических и динамических характеристик во всем диапазоне изменения механической нагрузки асинхронного двигателя. Кроме того, модель позволяет оценить состав гармонического спектра фазного тока и напряжения АД. Показано, что основной вклад в искажение формы фазного тока АД вносят 7-ю, 11-ю и 16-ю гармоники. Получены результаты имитационного моделирования при скалярном управлении частотой вращения АД и «вентиляторном» законе регулирования. Установлено, что в разомкнутой системе управления АЭП с пропорциональным законом управления, угловую скорость асинхронного двигателя можно регулировать в диапазоне от номинального значения до половины номинальной с ошибкой стабилизации, не превышающей 5%. Такой закон управления не требует корректировки выходного напряжения АИН. При «вентиляторном» законе регулирования ошибка стабилизации также не превышает 5% во всем диапазоне изменения механической нагрузки асинхронного двигателя. Однако при снижении частоты вращения АД ниже $0,6\omega_{ном}$ требуется корректировка напряжения питания АД, которая может быть организована перенастройкой параметров регулятора АИН с использованием наблюдателя частоты вращения асинхронного двигателя.

Ключевые слова: система электропитания, асинхронный электропривод, гармонический спектр, имитационное моделирование, *Matlab/Simulink*.

ВВЕДЕНИЕ

Системы электропитания асинхронных электроприводов (АЭП) большинства насосных установок удаленных погружных аппаратов и центробежных насосов, как правило, содержат протяженную кабельную линию и, как правило, большое число LC-фильтров низкой и высокой частоты, расположенных после автономного инвертора напряжения (АИН). Известно, что в пусковых режимах асинхронного двигателя (АД) возникают большие пусковые токи и перенапряжения, которые приводят к существенным потерям в кабельной линии и возникновению неустойчивых процессов в распределенной электромеханической системе [1-3].

Кроме того, широтно-импульсный способ формирования напряжения на выходе АИН вносит искажения в форму фазного тока и напряжения асинхронного двигателя. При этом наличие токов высших гармоник, создающих активные потери мощности, обуславливает перегрев электрооборудования, снижение коэффициента мощности, а также уменьшение электрического и механического КПД асинхронного двигателя [4-8].

Особенно сложные электрические и электромеханические процессы наблюдаются в установках электроцентробежных насосов (УЭЦН), применяемых в нефтегазовой отрасли [9-12].

Так, частотное регулирование скорости вращения погружного АД позволяет поддерживать высокий уровень эксплуатации скважин, поддерживая работу насоса и электродвигателя в режиме максимального КПД.

При этом для эффективного управления насосной установкой необходимо иметь информацию о скважинных параметрах в месте расположения насоса. Создание эффективной системы управления АЭП такого технологического оборудования предполагает предварительное моделирование не только законов регулирования, но и алгоритмов обработки данных измерительной информации.

Все это определяет необходимость создания имитационной модели асинхронного электропривода насоса погружного технологического оборудования, позволяющую исследовать статические и динамические режимы во всем диапазоне изменения механической нагрузки при различных законах управления электроприводом, а также проводить оценку гармонического спектра тока и напряжения.

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В статье рассматривается вариант компоновки основных элементов электропривода, когда насос с электродвигателем расположены на незначительном удалении от источника энергии переменного тока, силового преобразователя и блоков управления электроприводом (рис. 1).

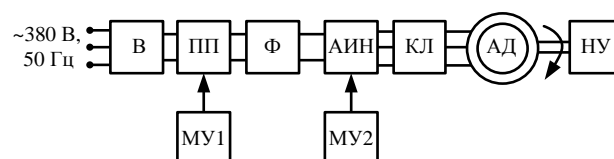


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения электропривода насосной установки

Переменное трехфазное напряжение поступает на неуправляемый выпрямитель (В), включение в схему понижающего преобразователя (ПП) дает возможность по сигналу управления, поступающего с модуля управления (МУ1), регулировать величину выпрямленного напряжения. Для сглаживания пульсаций напряжения присутствуют фильтры низких и высоких частот, представленные на **рис. 1** общим блоком (Ф). Для специального технологического оборудования кабельная линия (КЛ) может иметь небольшую длину и при моделировании рабочих режимов насосной установки (НУ) рассматривается как линия с сосредоточенными параметрами.

Напряжение, подаваемое на обмотку статора асинхронного двигателя (АД), формируется автономным инвертором напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) по сигналам управления, поступающим с модуля управления (МУ2).

Высокая крутизна фронтов (0,05–0,1 мкс) и большая частота (5–15 кГц) ШИМ-импульсов, формируемых IGBT-модулями инвертора, создают волновые электромагнитные процессы в кабельной линии, также при наличии резонансных частот в спектре выходного напряжения АИН на входе двигателя могут возникать многократные перенапряжения, способные вывести его из строя [1,13,14]. Для устранения этих нежелательных явлений в схему введен синусный фильтр, входящий в блок КЛ.

На основе анализа характеристик реальной установки в программной среде моделирования *Matlab* разработана имитационная модель (**рис. 2**), позволяющая с достаточной точностью моделировать основные режимы ее работы при различных законах управления АИН [15-17].

Алгоритм формирования напряжений в АИН строится на основе вертикальной системы управления. Блок *Source* (см. **рис. 2**) генерирует моделирующие напряжения, имеющие в своем спектре первую и третью гармоники:

$$u_{ам}(t) = \frac{k_m U_m}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} \times \left[\sin(\omega t) + \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\right) \sin(3\omega t) \right];$$

$$u_{бм}(t) = \frac{k_m U_m}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} \times \left[\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\right) \sin(3\omega t) \right];$$

$$u_{см}(t) = \frac{k_m U_m}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} \times \left[\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\right) \sin(3\omega t) \right],$$

где k_m, U_m – коэффициент модуляции и амплитуда управляющих сигналов.

Добавление сигнала тройной частоты позволяет повысить коэффициент преобразования по напряжению, а также повышает качество выходного напряжения АИН [7,18,19].

Генератор модулирующего напряжения инвертора представлен блоком *Source* (**рис. 3**) с тремя задающими входными сигналами. Первый сигнал определяет коэффициент модуляции, а значит, и величину основной гармоники выходного напряжения инвертора, значением второго сигнала является текущее время моделирования, третий сигнал определяет частоту моделирующего напряжения и является отношением требуемой частоты к номинальному значению.

Содержание блока *Control block*, осуществляющего управление инвертором, представлено на **рис. 4**. Генератор опорного напряжения треугольной формы имеет частоту 15 кГц, определяющую частоту коммутации ШИМ.

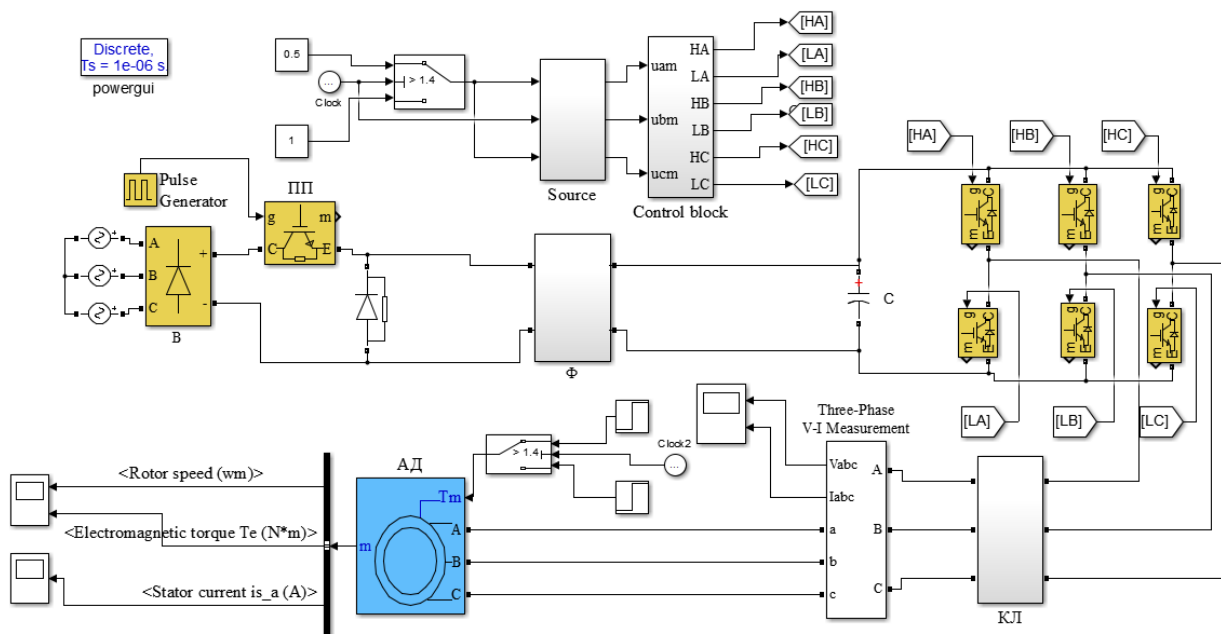


Рис. 2. Имитационная модель электропривода насосной установки в системе Matlab

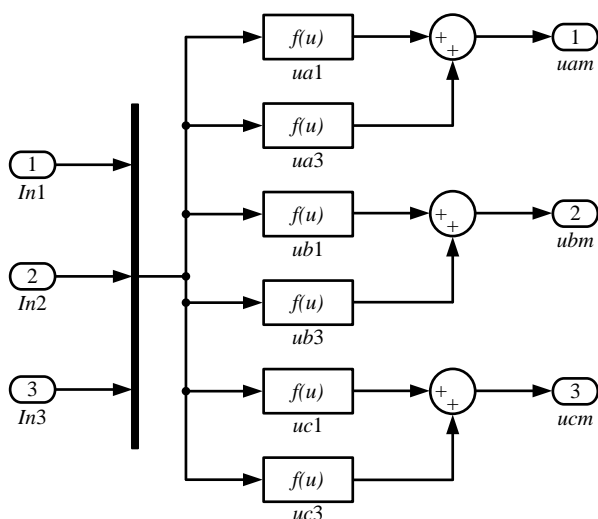


Рис. 3. Блок Source, задающий модулирующие напряжения инвертора

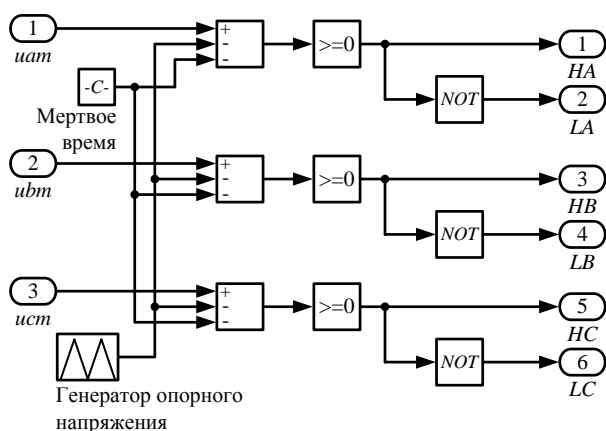


Рис. 4. Блок Control block, реализующий управление ключами инвертора

Устройства сравнения в каждом канале дают импульсы управления для соответствующих IGBT-транзисторов катодной группы инвертора, а импульсы управления для анодной группы поступают с выходов блоков инверсии.

В модели учтено «мертвое время» (рис. 4, блок «Мертвое время»), т.е. задержка на переключение ключей для предотвращения одновременного открытия двух ключей в одной стойке инвертора. В течение «мертвого времени» напряжение на фазе соответствующей стойки определяется направлением протекания тока. В имитационной модели кабельная линия представлена активно-индуктивным продольным и активно-емкостным поперечным сопротивлениями.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 5 представлены результаты моделирования работы насосной установки мощностью 40 кВт в установившемся режиме работы при моменте нагрузки, равном номинальному моменту асинхронного двигателя (рис. 5, а), и при моменте, равном 2/3 от номинального (рис. 5, б). На этих же графиках представлены данные, полученные в результате работы реальной установки при таких же нагрузках (выделены курсивом). Как показали проведенные исследования, относительная погрешность по амплитудным значениям тока статора не превышает 5%, что говорит об адек-

ватности представленной модели. Отклонение действующего значения фазного напряжения АД от номинального составило 7% при номинальной нагрузке и, соответственно, 3,2% при статическом моменте, равном 2/3 от номинального.

На рис. 6 представлен гармонический спектр тока фазы А при работе на номинальную нагрузку. Коэффициент гармоник равен 0,47%, при этом наблюдаются высокие уровни в области 7-й, 11-й и 16-й гармоник, что подтверждается экспериментальными данными [6].

Разработанная модель позволяет исследовать влияние вибраций, вызванных моментом нагрузки, на частоту вращения и гармонический состав тока статора. Так, на рис. 7 представлен гармонический спектр частоты вращения вала двигателя при появлении в моменте нагрузки гармоники с частотой 300 Гц.

Имитационное моделирование работы насосной установки позволило исследовать ее реакцию на скалярное управление приводом при различных режимах работы. Как известно, скалярный принцип частотного управления характеризуется минимальными затратами при технической реализации, а также возможностью построения разомкнутых систем управления без датчика скорости. Управление асинхронным двигателем обеспечивается совместным регулированием частоты и напряжения обмоток статора.

На рис. 8 представлены результаты моделирования электропривода установки с использованием пропорционального закона управления. Следует отметить, что по технологическим условиям регулирование угловой скорости асинхронного двигателя должно осуществляться в пределах от номинальной $\omega_{ном}$ до $0,5\omega_{ном}$.

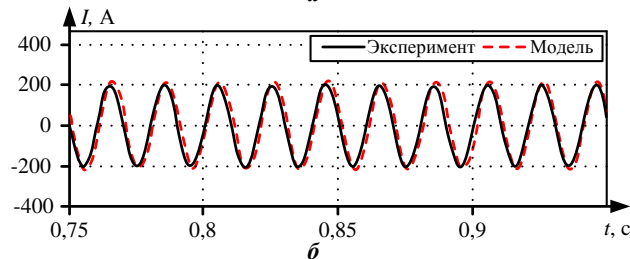
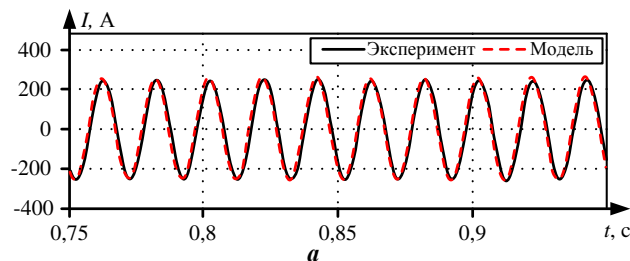


Рис. 5. Ток в обмотке статора АД

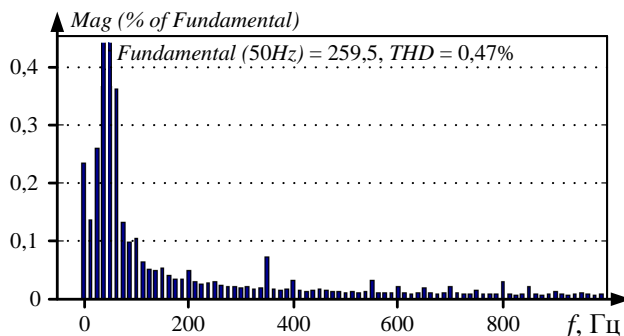


Рис. 6. Гармонический спектр тока статора фазы А

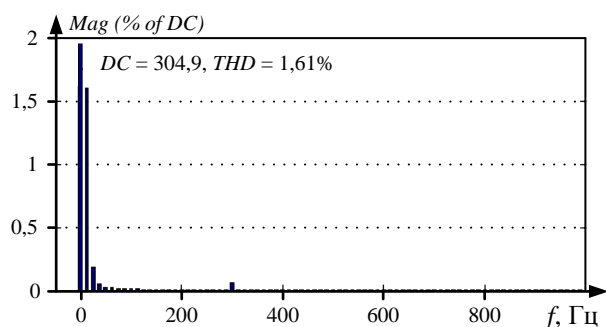


Рис. 7. Гармонический спектр частоты вращения двигателя

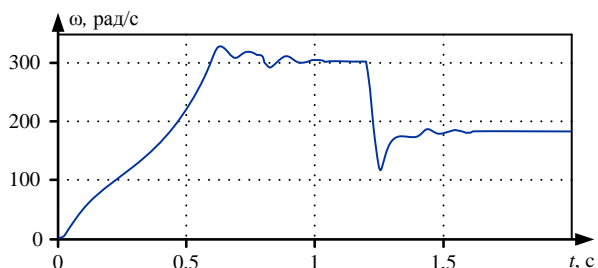


Рис. 8. Зависимость частоты вращения вала АД при пропорциональном законе управления

Включение установки происходит в режиме холостого хода, во время которого происходит зарядка всех конденсаторов, входящих в состав фильтров. После окончания переходного процесса в момент времени 0,8 с подключается насосная установка, работающая в номинальном режиме, двигатель при этом работает с номинальной частотой. В момент времени 1,2 с на инвертор подаются управляющие сигналы, и частота напряжения, вырабатываемая инвертором, уменьшается до $0,6f_{ном}$ и пропорционально частоте изменяется напряжение на выходе инвертора. В момент времени 1,4 с момент нагрузки уменьшается в 2,6 раз от номинального.

Как показали исследования, использование принципа пропорционального изменения частоты и напряжения позволяет регулировать угловую скорость от номинальной до $0,5\omega_{ном}$ во всем диапазоне изменения момента на валу двигателя, при этом погрешность регулирования не превышает 5%. При пропорциональном законе регулирования установившееся значение тока в обмотке статора не превышает номинального значения.

Следующим этапом являлось исследование работы модели при «вентиляторном» законе управления.

Для механизмов с вентиляторным характером момента нагрузки, в частности для насосов, закон регулирования представляется в виде $U/f^2=const$.

На рис. 9 представлены результаты моделирования электропривода установки с использованием «вентиляторного» закона управления.

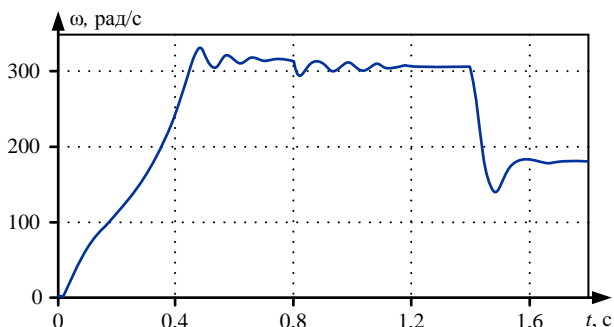


Рис. 9. Зависимость частоты вращения вала АД при «вентиляторном» законе управления

Включение установки также происходит в режиме холостого хода, в момент времени 0,8 с подключается насосная установка, работающая в номинальном режиме, двигатель при этом работает с номинальной скоростью. В момент времени 1,4 с на инвертор подаются управляющие сигналы, и частота напряжения, вырабатываемая инвертором, уменьшается до $0,6f_{ном}$. Соответственно, пропорционально квадрату частоты уменьшается напряжение на выходе инвертора. Также при снижении частоты уменьшается момент нагрузки в соответствии с вентиляторной характеристикой:

$$M(\omega) = M_{ном} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2$$

Регулирование угловой скорости без корректировки напряжения в данном случае возможно при регулировании в диапазоне от $\omega_{ном}$ до $0,6\omega_{ном}$. При дальнейшем снижении угловой скорости до значения, равного $0,5\omega_{ном}$, требуется корректировка напряжения, поступающего на инвертор, которое осуществляется преобразователем напряжения.

Сравнение кривых, представленных на рис. 8 и 9, показало, что при «вентиляторном» законе управления время регулирования при подключении номинальной нагрузки в 1,2 раза больше, чем при использовании скалярного закона, при этом величина перерегулирования практически одинакова. При снижении угловой скорости величина перерегулирования в 1,27 раз больше при скалярном законе управления, при этом время регулирования практически одинаково. Погрешность регулирования частоты вращения при выбранных законах управления не превышает 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований построена имитационная модель асинхронного электропривода, позволяющая моделировать статические и динамические режимы во всем диапазоне изменения нагрузки насосной установки погружного технологического оборудования, а также проводить оценку гармонического спектра фазных тока и напряжения двигателя. Адекватность модели подтверждается сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными.

В результате моделирования установлено, что при номинальной частоте на выходе АИН отклонение действующего значения фазного напряжения АД от номинального составляет 7% при номинальной нагрузке, что не соответствует требованиям по условиям эксплуатации. Значение коэффициента гармоник, характеризующего степень искажения фазного тока АД при номинальной нагрузке, составило 0,47%, при этом основной вклад в искажение сигнала вносили 7-я, 11-я и 16-я гармоники.

Рассмотрена работа имитационной модели при скалярном управлении частотой вращения асинхронного двигателя. Показано, что при пропорциональном законе управления угловую скорость можно регулировать в диапазоне $\omega_{ном}$ до $0,5\omega_{ном}$ с погрешностью, не превышающей 5% без корректировки напряжения. При «вентиляторном» законе погрешность также не пре-

вышает 5% во всем диапазоне изменения нагрузки, но при снижении скорости ниже $0,6\omega_{ном}$ требуется корректировка напряжения на выходе инвертора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Электротехнологические установки для нефтедобычи: монография / Омск: Минобрнауки России, Изд-во ОмГТУ, 2015. 160 с.
2. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.
3. Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I. Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal Value of the Supply Voltage // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2020. Pp. 1-4. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271308
4. Arumugam D., Sivasailam K. Investigation of pressure pulsation in the stages of an electric submersible pump at best efficiency point under various speeds // 8th Joint Fluids Engineering Conference. 2019. № 3В. doi: 10.1115/AJKFluids2019-5081
5. Steckling L., Heldwein M.L. Model-based synchronous optimal modulation for three-level inverters applied to electrical submersible pumps systems // PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. 2019. Pp. 408-415. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8767524> (дата обращения 28.11.20201).
6. Богданов А.А., Быстров Е.А. Анализ влияния алгоритмов и режимов работы трехфазного инвертора на спектральный состав выходных токов // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2021. С. 210-214.
7. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учебное пособие для бакалавров. М.: Изд-во Юрайт, 2015. 667 с.
8. Начаров Р.А., Рябишина Л.А. Оценка электромагнитной совместимости в электротехнических комплексах добычи нефти с частотно-регулируемым электроприводом // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. Вып. 5. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. С. 95-103.
9. Говорков Д.А., Курлаев Г.Н. Технология анализа режимов эксплуатации скважины с электронасосом в условиях реального времени // Вестник кибернетики. 2011. № 10. С. 22-26.
10. Феофилактов С.В. Системы погружной телеметрии для «жестких» условий эксплуатации // Инженерная практика. 2013. № 10. С. 8-11.
11. Романов В.С., Гольдштейн В.Г. К вопросу о повреждаемости, обслуживании и ремонтах погружного электрооборудования нефтедобычи // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. Т. 28. №2. С. 111-123. doi: 10.14498/tech.2020.2.8
12. Романов В.С., Гольдштейн В.Г. Методы динамического совершенствования повышения энергоэффективности и надежности погружных электродвигателей нефтедобычи // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. № 5(3). С. 96-100. doi: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-96-100
13. Liang X., El-Kadri A. Operational parameters affecting harmonic resonance in electrical submersible pump systems // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2019. № 42(3). Pp. 183-197. doi: 10.1109/CJECE.2019.2922384
14. Persson E. Transient effects in application of PWM inverters to induction motors // Transactions on Industry Applications. IEEE, 1992. № 28(5). Pp. 1095-1101. doi: 10.1109/28.158834
15. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
16. Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Рулевский В.М. Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. № 329(4). С. 119-131.
17. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 273 с.
18. Чаплыгин Е.Е., Хухтиков С.В. Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в трехфазных инверторах напряжения // Электричество. 2011. № 5. С. 53-61.
19. Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Кондратьев Д.Е. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения // Электричество. 2008. № 7. С. 23а-31

Поступила в редакцию 16 сентября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SIMULATION MODELING OF INDUCTION MOTOR DRIVE OF A SUBMERSIBLE TECHNOLOGICAL EQUIPMENT PUMP

Elena B. Shandarova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, shandarovaelena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>

Victor G. Bukreev

D.Sc. (Engineering), Professor, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, shandarovaelena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>

Evgeniy A. Bystrov

Postgraduate Student, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, bystrov-evgen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1829-6845>

The article is devoted to the research of induction motor drive (IMD) of a submersible pump for oil, gas and underwater processing equipment. The investigated electrotechnical system includes a cable line and LC-filters from the output of the voltage

source inverter, which supplies an induction motor (IM). A simulation model was created, which makes it possible to research the static and dynamic modes of IMD in the whole range of mechanical load variation of the IM, as well as to estimate the

harmonic spectrum of phase current and voltage. It is shown that the main contribution to the distortion of the motor phase current form is made by 7, 11 and 16 harmonics. The operation of the simulation model for scalar speed control of an induction motor is considered. It was established that in the open-loop control system of the IMD with proportional control mode, the angular speed of the IM can be regulated in the range from the nominal value to half of the nominal value with an error, that does not exceed 5%, without voltage correction. At the "fan" control mode, the error also does not exceed 5% in the whole range of mechanical load variation of the IM, but when the rotational speed decreases below $0.6\omega_{nom}$, it is required to correct the voltage at the output of the IMD. However, when the rotational speed of the IM decreases below $0.6\omega_{nom}$, it is required to correct the supply voltage of the IM, which can be organized by readjustment of the VSI regulator parameters based on the induction motor rotational speed observer.

Keywords: power supply system, induction motor drive, harmonic spectrum, simulation modeling, Matlab/Simulink.

REFERENCES

1. Kovalev A.Yu., Kuznetsov E.M., Anikin V.V. *Elektrotekhnologicheskie ustanovki dlya nefedobychi* [Electrotechnological installations for oil production]. Omsk, Omsk State University, 2015. 160 p. (In Russian)
2. Leznov B.S. *Chastotno-reguliruemyy elektropriwod nasosnykh ustanovok* [Frequency-controlled electric drive of pumping units]. Moscow, Machine building, 2013. 176 p. (In Russian)
3. Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I. Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal Value of the Supply Voltage. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. 2020, no. 9271308. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271308
4. Arumugam D., Sivasailam K. Investigation of pressure pulsation in the stages of an electric submersible pump at best efficiency point under various speeds. 8th Joint Fluids Engineering Conference. 2019, vol. 3B, no. 5081. doi: 10.1115/AJKFluids2019-5081
5. Steckling L., Heldwein M.L. Model-based synchronous optimal modulation for three-level inverters applied to electrical submersible pumps systems. PCIM Europe Conference Proceedings. 2019, pp. 408-415.
6. Bogdanov A. A., Bystrov E. A. Analysis of the influence of algorithms and operating modes of a three-phase inverter on the spectral composition of output currents. *Sbornik nauchnykh trudov "Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva"* [Materials of scientific papers "Electronic and electromechanical systems and devices"]. Tomsk, TSU Publ., 2021, pp. 210-214. (In Russian)
7. Zinoviev G.S. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, Yurayt Publ., 2015. 667 p. (In Russian)
8. Nacharov R.A., Ryabishina L.P. Evaluation of electromagnetic compatibility in electrical oil production complexes with a frequency-controlled electric drive. *Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov "Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy"* [International collection of scientific papers "Power and electrical systems"]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2018, pp. 96-104. (In Russian)
9. Govorkov D.A., Kurlaev G.N. Technology for analyzing well operation modes with an electric pump in real time. *Vestnik kibernetiki* [Proceedings of Cybernetics], 2011, no. 10, pp. 22-26. (In Russian)
10. Feofilaktov S.V. Submersible telemetry systems for "harsh" operating conditions. *Inzhenernaya praktika* [Engineering practice], 2013, no. 10, pp. 8-11. (In Russian)
11. Romanov V.S., Goldstein V.G. To the question of damage, maintenance and repairs of submersible electric equipment for oil production. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Tekhnicheskie nauki"* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2020, vol. 28, no. 2 (66), pp. 111-123. doi: 10.14498/tech.2020.2.8. (In Russian)
12. Romanov V.S., Goldstein V.G. Methods of dynamic improvement of energy efficiency and reliability of submersible electric motors for oil production. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines], 2017, no. 5 (3), pp. 96-100. doi: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-96-100. (In Russian)
13. Liang X., El-Kadri A. Operational parameters affecting harmonic resonance in electrical submersible pump systems. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2019, vol. 42(3), no. 8770309, pp. 183-197. doi: 10.1109/CJECE.2019.2922384
14. Persson E. Transient Effects in Application of PWM Inverters to Induction Motors. Transactions on Industry Applications. IEEE, 1992, 28(5), pp. 1095-1101. doi: 10.1109/28.158834
15. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow, MPEI Publ., 2015. 373 p. (In Russian)
16. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M. Power supply system model of remote processing equipment. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering]. 2018, no. 329(4), pp. 119-132. (In Russian)
17. Sokolovsky G.G. *Elektroprirody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Variable frequency AC drives]. Moscow, Publishing house Academia, 2006. 273 p. (In Russian)
18. Chaplygin E.E., Khukhtikov S.V. Pulse-width modulation with passive phase in three-phase voltage inverters. *Elektrichestvo* [Electricity], 2011, no. 5, pp. 53-61. (In Russian)
19. Obukhov S.G., Chaplygin E.E., Kondratyev D.E. Pulse-width modulation in three-phase voltage inverters. *Elektrichestvo* [Electricity], 2008, no. 7, pp. 23-31. (In Russian)

Шандарова Е.Б., Букреев В.Г., Быстров Е.А. Имитационное моделирование асинхронного электропривода насоса погружного технологического оборудования // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 13-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-13-18)

Shandarova E.B., Bukreev V.G., Bystrov E.A. Simulation Modeling of Induction Motor Drive of a Submersible Technological Equipment Pump. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 13-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-13-18)

Климаш В.С.¹, Петухов А.В.²¹ Комсомольский-на-Амуре государственный университет² ООО «Амурская лесопромышленная компания», г. Амурск, Хабаровский край

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИЙ КОМПЛЕКС С УЛУЧШЕННОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ

Авторами статьи указаны недостатки штатной схемы электропитания электропривода – потеря энергии на тормозных резисторах в процессе динамического торможения, срабатывание электронных защит преобразователей частоты вследствие переходных процессов в питающей сети от внешних воздействий, остановка линии при срабатывании АВР и авариях в системе электроснабжения. Срабатывание АВР на главной понизительной подстанции приводит к неуправляемой остановке автоматизированной линии и нарушению сложного технологического процесса при производстве шпона. При переключении на резерв возникает неуправляемый процесс остановки электропривода, что ведёт к потере контроля над технологическим процессом производства шпона и повреждению механических узлов оборудования. Предложено техническое решение, позволяющее за счёт перевода электродвигателей электропривода в режим генераторного торможения на интервале времени срабатывания АВР замедлить разряд конденсатора общего звена постоянного напряжения и увеличить время ожидания включения резервного питания с постепенным снижением скорости для подготовки к корректной остановке в случае неуспешного срабатывания АВР или разгона привода с любой пониженной скорости при успешном срабатывании АВР. В среде MatLab разработаны математические модули электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии и его системы управления. Приведена блочно-модульная имитационная модель электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии с реальными параметрами. Численными экспериментами проведены исследования рассматриваемого способа для управления электроприводом электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии во время кратковременного исчезновения напряжения в питающей сети при срабатывании АВР, авариях в системе электроснабжения. Рассмотрены осциллограммы тока и напряжения элементов устройства. Результаты исследования показали, что применение рассматриваемого способа управления электроприводом позволяет обеспечить его работу без остановки при срабатывании АВР, кратковременной потере напряжения в питающей сети, возникающей при авариях в системе электроснабжения. Рассмотрена возможность практического использования предлагаемого способа для управления электроприводом электротехнического комплекса автоматизированной линии.

Ключевые слова: частотно-регулируемый асинхронный электропривод, автономный инвертор напряжения, общий выпрямитель, общее звено постоянного напряжения, общий конденсатор, провал напряжения в сети, энергия генераторного торможения, способ управления электроприводом при срабатывании АВР, повышение надёжности оборудования, моделирование электротехнического комплекса в среде MatLab.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим фактором любого современного промышленного предприятия является качество выпускаемой продукции, надёжность и энергоэффективность эксплуатируемого оборудования. В городе Амурск Хабаровского края на заводе по глубокой переработке древесины ООО «Амурская лесопромышленная компания» эксплуатируются сложные, высокотехнологичные автоматизированные линии по производству лущёного шпона. Производство шпона является непрерывным процессом, неконтролируемая остановка оборудования приводит к увеличению времени повторного запуска, браку продукции и к преждевременному выходу из строя оборудования из-за возникновения перегрузки в механизмах. Неуправляемая остановка оборудования возникает вследствие срабатывания защит преобразователей частоты в результате возникновения переходных процессов в системе электроснабжения, срабатывании АВР на понизительных подстанциях и авариях в системе электроснабжения, что в конечном итоге сказывается на себестоимости выпускаемой продукции. Авторами предложен способ управления электроприводом электротехнического комплекса автоматизированной линии по производству шпона, позволяющий повысить надёжность оборудования, устранить влияние на его работу аварий, возникающих

в системе электроснабжения, а также рационально использовать энергию генераторного торможения. Очевидно, что практическое применение рассматриваемого способа управления электроприводом и способа электропитания автономных инверторов будет способствовать снижению себестоимости продукции, выпускаемой предприятием.

ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ЛИНИИ

Для производства шпона на заводе по глубокой переработке древесины ООО «Амурская лесопромышленная компания» используются деревообрабатывающие линии HYPER-9W Японского производства, разработанные и изготовленные компаниями UROKKO и HANIMOTO. Деревообрабатывающая линия представляет собой сложный электротехнический комплекс, в состав которого входят частотно-регулируемые асинхронные электроприводы основных (конвейера распиловки, центровочно-загрузочного устройства, токарного узла, главного конвейера сортировки, конвейера сортировки №1 и 2) и вспомогательных (конвейера отходов, конвейеров выгрузки готовой продукции) механизмов. Преобразователи частоты (ПЧ) и асинхронные двигатели (АД) оснащены датчиками обратной связи, сигналы с которых поступают на микропроцессорные системы управления (СУИ) инверторами ПЧ и на программируемый контроллер системы авто-регулирования комплексом. Система авторегулирования

линией, воздействуя на СУИ преобразователей частоты, выполняет разгон и торможение электроприводов в соответствии с заданной программой обработки сырья для получения листов шпона определённого размера и толщины. Технология изготовления шпона такова, что в процессе работы линии все асинхронные двигатели периодически изменяют скорость, переходя из режима разгона в режим торможения с различной интенсивностью, при этом часть электродвигателей работает в режиме динамического торможения, в то время как остальные АД работают в двигательном режиме.

Штатная схема электротехнического комплекса, включающая систему электроснабжения и систему электропривода, приведена на рис. 1. В ней для каждого из 56 АД применен индивидуальный ПЧ. Каждый содержит встроенный диодный выпрямитель и транзисторный автономный инвертор напряжения с входным конденсатором *C* и системой управления с ШИМ формированием синусоидального тока АД. В состав ПЧ также входит блок динамического торможения. Он содержит внешний тормозной резистор и встроенный в ПЧ тормозной транзистор с системой импульсного регулирования торможением. Все преобразователи частоты подключены к трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ, оснащенной автоматическим включением резервного питания (АВР).

К недостаткам штатной схемы следует отнести большие потери энергии на тормозных резисторах при динамическом торможении. Вместе с тем в процессе эксплуатации электротехнического комплекса были выявлены еще более существенные недостатки штатной схемы. Это срабатывание электронных защит преобразователей частоты при отклонениях и колебаниях напряжения в питающей сети и неуправляемая остановка автоматизированной линии с нарушением технологического процесса при производстве шпона [1].

Для устранения части указанных недостатков применена схема электропитания автономных инверторов [2], представленная на рис. 1. В этой схеме для каждого асинхронного двигателя 7 применен свой индивидуальный автономный инвертор напряжения 6. Входы всех АИН объединены, соединяя параллельно их входные конденсаторы 5 в общий конденсатор *C* с улучшенными демпфирующими свойствами на изменения напряжения в сети. Входной для всех инверторов конденсатор *C* и выходной 3 дроссель *L* диодного выпрямителя 2 образуют LC-фильтр общего звена постоянного напряжения электропривода. Вход диодного выпрямителя 2 подключен к силовому трансформатору 1 подстанции 10/0,4 кВ [2]. Объединение автономных инверторов электропривода общим звеном постоянного напряжения 4 позволило полезно использовать энергию генераторного торможения при непрерывном энергообмене между электродвигателями, работающими в двигательном режиме и режиме генераторного торможения без дополнительного преобразования потерь энергии, связанных с рекуперацией ее в сеть. Суммарная ёмкость общего конденсатора звена постоянного напряжения, образованная параллельным соединением конденсаторов 5, подключенных параллельно входам автономных инверторов 6, устраняет влияние переходных процессов, возникающих в питающей сети и звене постоянного напряжения на работу электропривода, исключая срабатывания электронных защит.

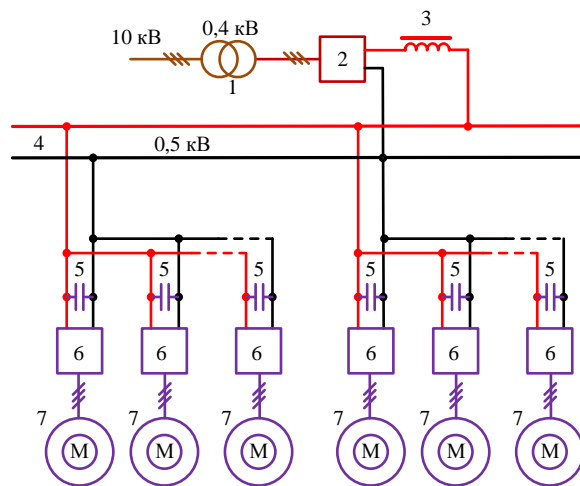


Рис. 1. Схема электропитания автономных инверторов комплекса

Производство шпона является сложным технологическим процессом. Нарушение в работе оборудования и некорректная его остановка приводит к длительным простоям, браку продукции, вызывает дополнительный износ механических узлов вследствие возникновения перегрузок в механизмах в процессе неуправляемой остановки оборудования.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

При переключении АВР или возникновении аварий на более высоких уровнях напряжения происходит остановка деревообрабатывающей линии из-за срабатывания защит минимального напряжения промежуточного звена между выпрямителем и инверторами [3,4]. Это приводит к полной аварийной остановке производства со сбоям программного обеспечения, браку выпускаемой продукции и, как следствие, снижению экономической эффективности предприятия.

Поэтому решение проблемы повышения надёжности электрооборудования в условиях как кратковременного, так и продолжительного перерыва в электропитании является весьма актуальным.

Предлагается техническое решение, предотвращающее сбой при повторном включении или аварийную остановку деревообрабатывающей линии при перерывах электроснабжения. Это специальное для данного комплекса способ управления инверторами [5]. На рис. 2 представлена предлагаемая схема электротехнического комплекса.

Схема содержит следующие элементы: 1 – питающий основной фидер, 2 – питающий резервный фидер, 3 – устройство автоматического включения резерва, 4 – понижающий трансформатор, 5 – трехфазная сеть 0,4 кВ, 6 – диодный выпрямитель, 7 – входной L-фильтр, 8 – общие шины постоянного напряжения, 9 – система управления деревообрабатывающей линией, 10 – детектор напряжения, 11 – устройство коррекции выходной частоты автономных инверторов, 12 – конвейер распиловки, 13 – центровочно-загрузочное устройство, 14 – токарный узел, 15 – конвейер сортировки, 16 – сглаживающие C-фильтры, 17 – автономные инверторы с индивидуальными системами управления, 18 – асинхронные двигатели.

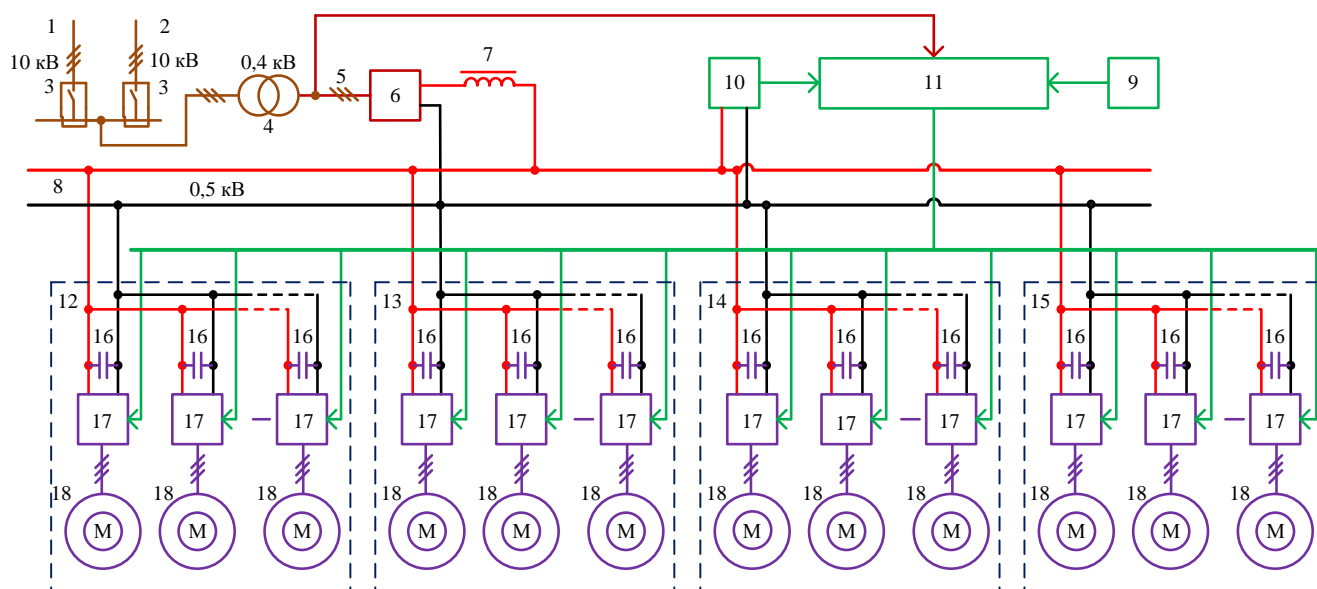


Рис. 2. Функциональная схема комплекса с предлагаемым блоком управления

Асинхронные двигатели 18 привода всех механизмов 12-15 деревоперерабатывающей линии подключены к выходам трехфазных автономных инверторов напряжения 17, к входу каждого из которых параллельно подключен C -фильтр 16 и общие шины постоянного напряжения 8, к которым также через сглаживающий дроссель 7 подключен выход диодного выпрямителя 6, вход которого подключен к трехфазной сети 5. Трехфазная сеть 5, содержащая понижающий трансформатор 4, подключена через устройство автоматического резерва 3 к питающему основному фидеру 1 или резервному фидеру 2. Управление интенсивностью разгона и торможения электропривода осуществляется от общей системы управления деревообрабатывающей линией 9, на выходе которой формируется задание интенсивностью разгона и торможения поступающее на один из входов устройства коррекции выходной частоты автономных инверторов 11.

Устройство функционирует следующим образом. Диодный выпрямитель, получающий электропитание через силовой трансформатор и устройство автоматического включения резерва от питающего основного или резервного фидера, преобразует трехфазную систему линейных напряжений (с действующим значением 380 В) в выпрямленное напряжение, которое через сглаживающий дроссель выпрямителя поступает на общие шины постоянного напряжения 8. Выпрямленное напряжение подается на входы автономных инверторов 17. Автономные инверторы напряжения 17 управляют пуском, торможением, регулированием скорости асинхронных электродвигателей 18 приводов механизмов 12-15 в соответствии с заданием интенсивности разгона и торможения от общей системы управления деревообрабатывающей линией 9. Устройство коррекции выходной частоты автономных инверторов имеет три входа и один выход. Один из входов подключен к выходу системы управления деревообрабатывающей линией 9, определяющей интенсивность разгона и торможения электродвигателей электропривода, второй – к выходу детектора напряжения 10, предназначенного для контроля напряжения на общих шинах постоянного напря-

жения, третий вход используется для регистрации момента отклонения напряжения в трёхфазной питающей сети. Выход устройства контроля напряжения и управления частотой подключен к входам систем управления автономными инверторами.

Устройство коррекции выходной частоты автономных инверторов при регистрации отсутствия напряжения в одной или всех фазах трёхфазной сети переводит электродвигатели, подключенные к выходам автономных инверторов, в режим генераторного торможения. Перевод электродвигателей в режим генераторного торможения замедляет разряд конденсатора общего звена постоянного напряжения и увеличивает время ожидания включения резервного питания с постепенным снижением скорости для подготовки к корректной остановке в случае неуспешного срабатывания АВР или разгона привода с любой пониженной скорости при успешном срабатывании АВР. Для увеличения времени ожидания включения резервного питания с целью замедления разряда конденсатора звена постоянного напряжения предусматривается отключение части автономных инверторов привода вспомогательных механизмов и конвейеров деревообрабатывающей линии. Для увеличения времени ожидания включения резервного питания предусматривается возможность подключения параллельно конденсаторам C фильтров суперконденсаторов [6-10].

Применение рассматриваемого способа позволяет обеспечить работу оборудования без его остановки при кратковременном отсутствии напряжения в одной или всех фазах на входе общего выпрямителя и управлять процессом его плавной остановки. Плавная остановка линии снижает динамические нагрузки на механизмы, предотвращая выход их из строя. Отличительная особенность рассматриваемого способа заключается в том, что устройство управления выходной частотой автономных инверторов не является самостоятельным физическим устройством и реализуется программным способом за счёт изменения алгоритма программы управления находящейся в памяти программируемого логического контроллера системы управления 9.

Цель проводимого исследования – выяснить возможность практического применения рассматриваемого способа управления электроприводом деревообрабатывающей линии и наметить перспективы работы в данном направлении. При этом необходимо ориентироваться на параметры действующего оборудования, в данном случае параметры электропривода автоматизированной линии по производству шпона HYPER-9W, эксплуатируемой в ООО «Амурская лесопромышленная компания».

Для достижения поставленной цели потребовалось решить ряд задач в среде MatLab [11]:

- разработать математический модуль устройства управления автономными инверторами;
- разработать математическую модель механической нагрузки с параметрами, близкими к параметрам автоматизированной линии;
- разработать имитационную модель электропитания автоматизированной линии;
- численными экспериментами исследовать возможность поддержания напряжения в звене постоянного напряжения на интервале времени срабатывания АВР и возникновении кратковременных аварий в сети электроснабжения.

ИССЛЕДОВАНИЯ НА МОДЕЛИ

Исследования способа управления электроприводом деревоперерабатывающей линии во время автоматического включения резерва производились на разработанной блочно-модульной модели в среде MatLab [11].

На рис. 3 и 4 представлены осциллограммы, полученные в ходе имитационного моделирования. На рис. 3 представлены осциллограммы, полученные на интервале времени 0,6–1,2 с, на рис. 4 – на интервале 1,2–1,8 с. При постановке численных экспериментов на имитационной модели моделировался процесс срабатывания АВР с полным снятием напряжения на входе трёхфазного выпрямителя в момент времени 0,62 с (рис. 3, а), а в момент времени 1,12 с напряжение полностью восстанавливалось по завершении переключения АВР. На интервале времени срабатывания АВР в течении 500 мс оценивалась степень изменения напряжения в общем звене постоянного напряжения с использованием рассматриваемого способа (рис. 3, б). Использование способа управления позволяет поддерживать в звене постоянного напряжения напряжение на уровне 320 В при полном отсутствии напряжения на входе трёхфазного выпрямителя в течение 500 мс.

При переводе электродвигателей в режим генераторного торможения скорость линии снижалась на 30%. Оценка снижения скорости деревообрабатывающей линии производилась по скорости электродвигателя одного из механизмов, которая снижалась с номинальной, равной 1420 об/мин, до 980 об/мин (рис. 3, з). После восстановления напряжения на входе трёхфазного выпрямителя производился плавный разгон электродвигателя с 980 до 1420 об/мин (осциллограмма на рис. 4, з).

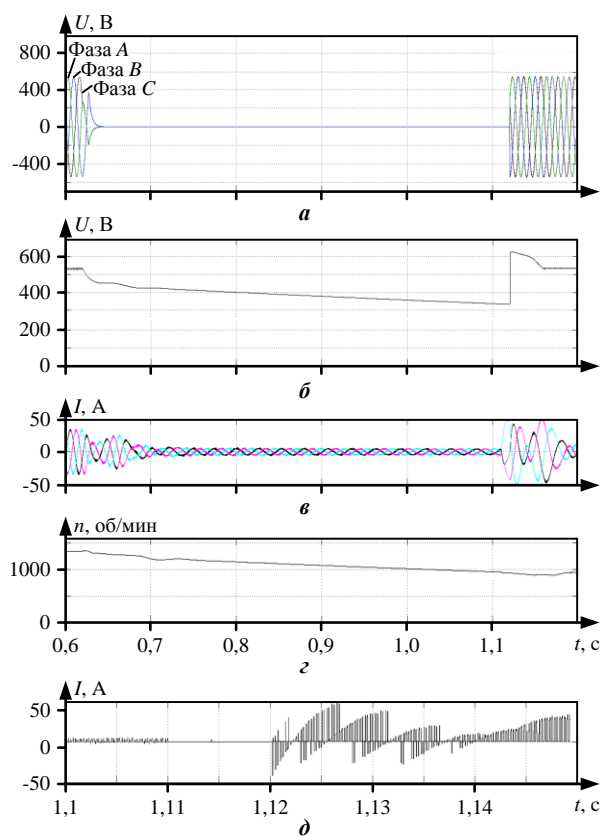


Рис. 3. Осциллограммы, полученные в ходе имитационного моделирования на интервале времени 0,6–1,2 с: а – напряжение на входе трёхфазного выпрямителя; б – напряжение в звене постоянного напряжения; в – фазные токи, потребляемые электродвигателем; з – скорость вращения электродвигателя; д – входной ток инвертора напряжения в момент восстановления электроснабжения

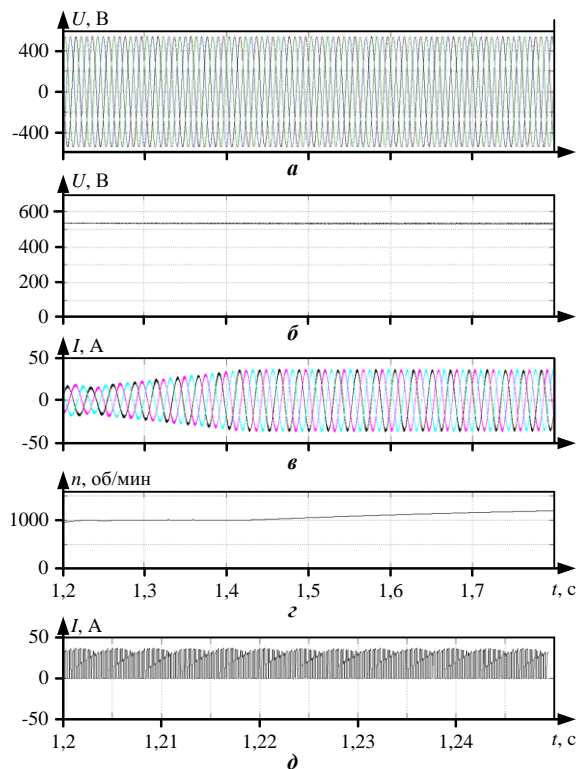


Рис. 4. Осциллограммы, полученные в ходе имитационного моделирования на интервале времени 1,2–1,8 с (окна а – д аналогичны рис. 3)

На имитационной модели производилась оценка амплитуды фазного тока электродвигателя, подключенного к выходу автономного инвертора напряжения (рис. 3, в и 4, в). На интервале времени 1,12-1,18 с одновременно с восстановлением электроснабжения осуществлялся перевод электродвигателя в генераторный режим за счёт снятия напряжения с обмоток электродвигателя в соответствии с алгоритмом управления, заложенным в системе управления. С момента времени 1,18 с (см. рис. 3, в) до 1,8 с (см. рис. 4, в) производился плавный разгон электродвигателя. В ходе исследования установлено, что амплитуда фазного тока в обмотках электродвигателя не превышает максимально допустимого значения в момент генераторного торможения на интервале времени 0,6-1,12 с, во время процесса перехода из режима торможения в режим разгона на интервале 1,12-1,18 с и в процессе разгона двигателя до номинальной скорости на интервале 1,18-1,8 с. В процессе исследования установлено, что амплитуда тока на всём интер-

вале времени с момента срабатывания АВР до момента разгона электродвигателя до номинальной скорости не превышает предельно допустимого значения.

На рис. 5 представлена имитационная модель электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии, состоящая из функциональных блоков, структура которых представлена на рис. 6. Блок Б1 имитирует работу системы АВР, Б2 – схема контроля трёхфазного напряжения, формирующая на своём выходе сигнал отсутствия напряжения в одной или всех фазах трёхфазной системы, Б3 – система управления инверторами напряжения, реализующая рассматриваемый способ управления при отсутствии напряжения в трёхфазной сети, ИНВ1-ИНВ4 – инверторы напряжения с индивидуальными системами управления. Элемент З.С. – общий задатчик интенсивности разгона и торможения электродвигателей электропривода. Трёхфазный выпрямитель, L-фильтр, конденсаторы C1-C4 образуют общее звено постоянного напряжения, к которому подключены инверторы напряжения.

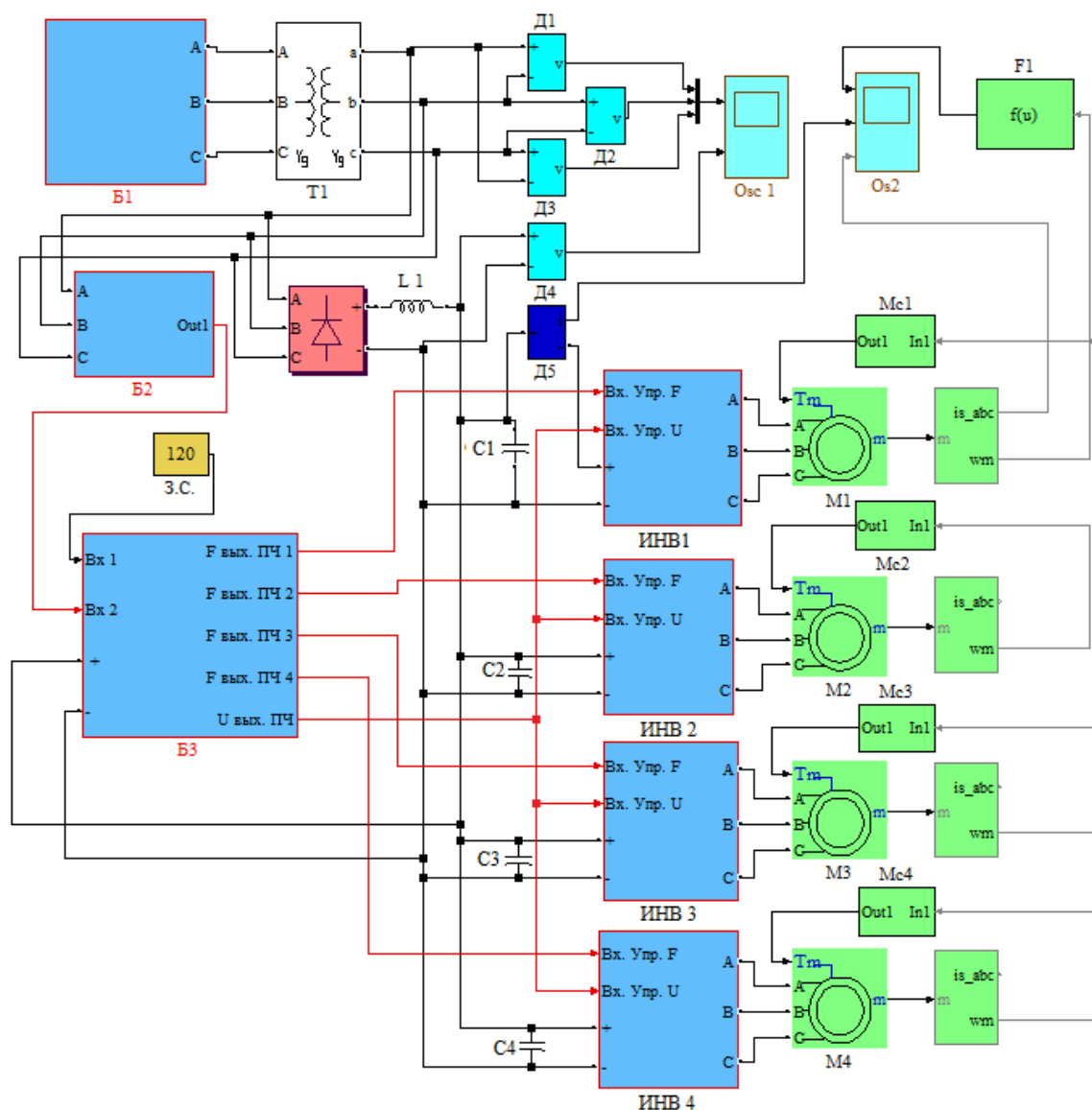
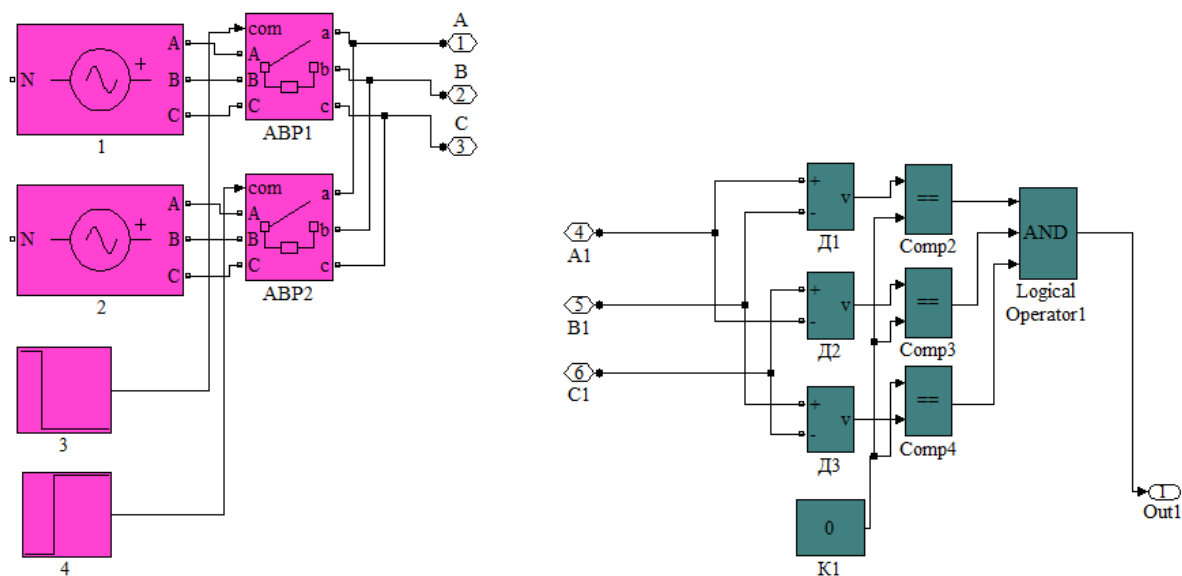
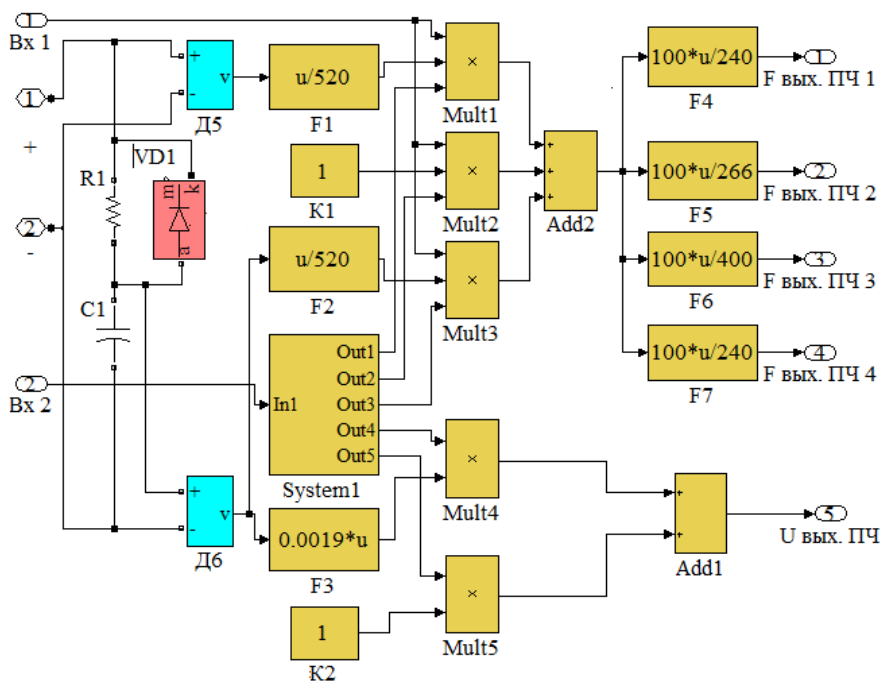


Рис. 5. Имитационная модель электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии

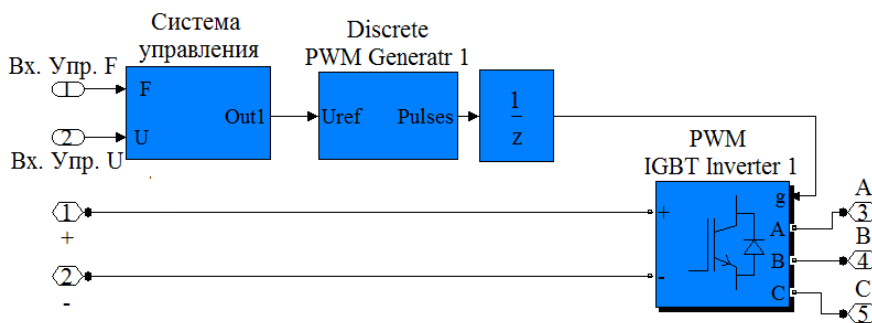


a

б



в



г

Рис. 6. Структура функциональных блоков имитационной модели электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии: *a* – структура блока АВР; *б* – структура блока схемы контроля трёхфазного напряжения; *в* – структура блока системы управления; *г* – структура инвертора напряжения с индивидуальной системой управления

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Проведённые на имитационной модели эксперименты: оценка значения напряжения в общем звене постоянного напряжения, оценка изменения скорости деревообрабатывающей линии, исследование значения силы тока в обмотках электродвигателя и силы тока на входе автономного инвертора подтверждают возможность практического применения рассматриваемого способа для управления электроприводом электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии во время кратковременного исчезновения напряжения в питающей сети при срабатывании АВР и возникновении аварий в сети электроснабжения. Практическое использование предлагаемого способа управления электроприводом позволит устранить остановку производства, уменьшить брак, снизить износ оборудования и повысить экономическую эффективность предприятия.

В настоящее время на предприятии ООО «Амурская лесопромышленная компания» проведена апробация схемы электропитания группы автономных инверторов напряжения от общего выпрямителя. Апробация предлагаемой схемы системы питания автономных инверторов подтвердила её преимущество перед традиционной схемой электропитания, в которой используются автономные инверторы напряжения с индивидуальными выпрямителями и блоками торможения, входящие в состав преобразователей частоты. Планируется дальнейшая исследовательская работа, направленная на изучение динамических нагрузок на механизмы и узлы деревообрабатывающей линии, возникающих при торможении и разгоне привода. В настоящее время проводится проектная работа по применению рассматриваемого способа управления электроприводом деревообрабатывающей линии в новом качестве и его практическая апробация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования, направленные на совершенствование электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии, позволили сделать следующие выводы:

1. Применение схемы электропитания группы автономных инверторов от общего выпрямителя позволяет полезно использовать энергию генераторного торможения, вырабатываемую электродвигателями, работающими в режиме генераторного торможения без дополнительного преобразования энергии с минимальными её потерями. Суммарная ёмкость общего конденсатора звена постоянного напряжения, образованная параллельным соединением конденсаторов C фильтров, подключенных к входам автономных инверторов, устраняет влияние переходных процессов, возникающих в питающей сети и звене постоянного напряжения на работу электропривода, исключая срабатывание электронных защит.

2. На разработанной в MatLab имитационной модели электротехнического комплекса исследованы значения токов и напряжений в процессе генераторного торможения электродвигателей при применении способа управления выходной частотой автономных

инверторов напряжением звена постоянного напряжения. В результате исследований численными экспериментами установлено следующее:

а) построение схемы электропитания автономных инверторов от общего выпрямителя обеспечивает устранение влияния переходных процессов, возникающих в питающей сети на работу оборудования;

б) применение способа управления выходной частотой автономных инверторов напряжением звена постоянного напряжения позволяет обеспечить работу оборудования без его остановки при срабатывании АВР;

в) применение способа управления выходной частоты автономных инверторов напряжением звена постоянного напряжения позволяет обеспечить работу оборудования без его остановки при кратковременных нарушениях в системе электроснабжения.

3. Предлагаемый способ управления позволяет корректно останавливать автоматизированную линию при отключении питающего напряжения и исключить возникновение дополнительных нагрузок, возникающих в механизмах при неуправляемой остановке оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов А.В., Климах В.С. Опыт эксплуатации комплекса электроприводов автоматизированных линий по производству шпона // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научн.-технич. конф. студентов и аспирантов. Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2017. С. 858-860.
2. Бугров В.Г. Электромеханические переходные процессы в системах электроснабжения: учебное пособие. Тверь: Тверской гос. техн. ун-т, 2005. 114 с.
3. Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А. Преобразовательная техника: учебное пособие. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.
4. Klimash V.S., Petuhov A.V. Electric drive with common rectifier and individual inverters for asynchronous electric motors of woodworking line // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934051
5. Пат. 2740813 Российская Федерация, Н02Р 1/16, Н02Р 3/06. Способ управления электроприводом деревообрабатывающей линии во время автоматического включения резерва / Климах В.С., Петухов А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет». № 2020107224; заявл. 17.02.2020; опубл. 21.01.2021.
6. Применение аккумуляторов для бесперебойного питания частотно-регулируемого электропривода / А.Н. Ладыгин, Д.Д. Богаченко, Н.А. Ладыгин, В.В. Холин // Труды 8-й международной конференции по автоматизированному электроприводу. Саранск: Мордовский университет, 2014. № 2. С. 21-23.
7. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Костылёв А.В. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод с ёмкостным накопителем энергии // Электротехника. 2012. № 9(61). С. 30-35.
8. Коваль А.С., Кондратенко А.Г. Модель в среде Матлаб накопителя энергии на базе суперконденсатора и двухуровневого повышающе-понижающего преобразователя DC/DC // Вестник Белорусско-Российского университета. 2020. №2 (67). С.106-112. doi: 10.53078/20778481_2020_2_106
9. Коваль А.С., Кондратенко А.Г. К вопросу расчёта суперконденсатора накопителя энергии на базе двухуровневого

повышающе-понижающего преобразователя DC/DC // Вестник Белорусско-Российского университета. 2020. №4(69). С. 89-96. doi: 10.53078/20778481_2020_4_89

10. Smriti D. Comparison of DVR and D-STATCOM for voltage quality improvement // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2014. № 4 (10). Pp. 187-193.

11. Свидетельство о гос. регистрации прогн. для ЭВМ № 2021611165. Программный комплекс математической модели электропривода деревообрабатывающей линии в среде MATLAB / Климаш В.С., Петухов А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»; заявл. 18.12.20 опубл. 22.01.21.

Поступила в редакцию 06 октября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTRICAL WOOD-WORKING COMPLEX WITH IMPROVED ENERGY EFFICIENCY AND PRODUCTIVE RATE

Vladimir S. Klimash

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, klimash@yandex.ru

Alexander V. Petukhov

Postgraduate student, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, petuhovalexander@yandex.ru

The flaws are revealed, the disadvantages of the standard electric drive power supply scheme are indicated, in particular, the energy loss on the brake resistors during dynamic braking, the triggering of electronic protection of frequency converters due to transients in the supply network from external influences, the line stop when the automatic switching of the reserve and accidents in the power supply system. The automatic activation of the reserve at the main step-down substation leads to an uncontrolled stop of the automated line and disruption of a complex technological process in veneer production. When switching to the reserve, an uncontrolled process of stopping the electric drive occurs, which leads to control loss over the technological process of veneer production and damage to mechanical components of the equipment. A technical solution is proposed that makes it possible, by switching the electric motors of the electric drive to the generator braking mode at the time interval of the automatic activation of the reserve, to slow down the capacitor discharge in the common constant voltage link and increase the waiting time for the backup power with a gradual decrease in speed to prepare for a correct stop in case of unsuccessful activation of the automatic activation of the reserve or drive acceleration from any reduced speed with successful automatic reserve activation. "Matlab" environment was used to develop mathematical modules of the electrical complex of the woodworking line and its control systems. A block – modular simulation model of an electrical complex of a woodworking line with real parameters is presented. Numerical experiments have been carried out to study the method under consideration for controlling the electric drive of the electrical complex of the woodworking line during the short-term disappearance of voltage in the supply network when the automatic activation of the reserve is triggered or in the case of accidents in the power supply system. The oscillograms of the current and voltage of the device elements are considered. The results of the study showed that the application of the considered method of controlling the electric drive makes it possible to ensure its operation without stopping when the automatic activation of the reserve is triggered or for a short-term loss of voltage in the supply network arising from accidents in the power supply system. The possibility of practical use of the proposed method for controlling the electric drive of an electrical complex of an automated line is considered.

Keywords: frequency-controlled asynchronous electric drive, autonomous voltage inverter, common rectifier, common DC voltage link, common capacitor, voltage drop in the network, generator braking energy, a method for controlling the electric drive when automatic reserve activation is triggered, improving

the reliability of equipment, modeling of an electrical complex in MatLab.

REFERENCES

1. Petukhov A.V., Klimash V.S. Operating experience of the complex of electric drives of automated lines for veneer production. *Nauchno-tekhnicheskoye tvorchestvo aspirantov i studentov: materialy 47-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov* [Scientific and technical creativity of postgraduates and students: materials of the 47th Scientific and Technical Conference of students and postgraduates]. Komsomolsk-on-Amur, KNAU Publ., 2017. pp. 858-860. (In Russian)
2. Bugrov V.G. *Elektromekhanicheskiye perekhodnyye protsessy v sistemakh elektrosnabzheniya* [Electromechanical transients in power supply systems]. Tver, Tver State Technical University Publ., 2005. 114 p. (In Russian)
3. Gelman M.V., Dudkin M.M., Preobrazhenskiy K.A. *Preobrazovatel'naya tekhnika* [Transformative technology]. Chelyabinsk, SUSU Publishing Center, 2009. 425 p. (In Russian)
4. Klimash V.S., Petuhov A.V. Electric Drive with Common Rectifier and Individual Inverters for Asynchronous Electric Motors of Woodworking Line. International Conference on Industrial Engineering and Modern. IEEE, 2019. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934051
5. Klimash V.S., Petukhov A.V. *Sposob upravleniya elektroprivodom derevoobrabatyvayushchey linii vo vremya avtomaticheskogo vklyucheniya rezerva* [Method of controlling the electric drive of a woodworking line during automatic activation of the reserve]. Patent RF, no. 2740813, 2021.
6. Ladygin A.N., Bogachenko D.D., Ladygin N.A., Kholin V.V. The use of batteries for uninterruptible power supply of a frequency-controlled electric drive. *Trudy 7-y mezhdunarodnoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the 7th International Conference on Automated Electric Drive] Saransk, Mordovian University, 2014, vol. 2, pp. 21-23. (In Russian)
7. Braslavskiy I.Y., Ishmatov Z. Sh., Kostylev A.V. Asynchronous frequency-controlled electric drive with capacitive energy storage. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2012, no. 9(61), pp. 30-35. (In Russian)
8. Koval A.S., Kondratenko A.G. A model in the Matlab environment of an energy storage device based on a super capacitor and a two-level step-up/step-down DC/DC converter. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2020, no. 2(67), pp. 106-112. doi: 10.53078/20778481_2020_2_106. (In Russian)

9. Koval A.S., Kondratenko A.G. On the issue of calculating the energy storage supercapacitor based on a two-level step-up/step-down DC/DC converter. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2020, no. 4(143), pp. 89-96. doi: 10.53078/20778481_2020_4_89. (In Russian)
10. Smriti D. Comparison of DVR and D-STATCOM for voltage quality improvement. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2014, no. 4(10), pp. 187-193.
11. Klimash V.S., Petukhov A.V. *Programmnyy kompleks matematicheskoy modeli elektroprivoda derevoobrabatyvayushchey linii v srede MATLAB* [The software package of the mathematical model of the electric drive of the woodworking line in the MATLAB environment]. Computer program RF, no. 2021611165, 2021.
-

Климаш В.С., Петухов А.В. Электротехнический деревообрабатывающий комплекс с улучшенной энергоэффективностью и производительностью // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 19-27. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-19-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-19-27)

Klimash V.S., Petukhov A.V. Electrical Wood-Working Complex with Improved Energy Efficiency and Productive Rate. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 19-27. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-19-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-19-27)

Одинцов К.Э., Петушков М.Ю., Иванов Е.Ф., Бочкарев А.А., Лыгин М.М.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЗАВОДСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Характерной особенностью отечественных металлургических предприятий является наличие собственных электростанций, использующих в качестве топлива вторичные топливные газы – доменный и коксовый. Такие электростанции имеют относительно сложную систему собственных нужд, неотъемлемой частью которой являются различные электроприводы, в том числе частотно-регулируемые. Преобразователи частоты (ПЧ), являющиеся отличительным звеном указанных систем электропривода, имеют определенные технические особенности, которые должны учитываться при их проектировании и эксплуатации. В статье рассмотрен вопрос обеспечения устойчивой работы частотно-регулируемых приводов (ЧРП) заводских электростанций металлургических производств при нарушениях внешнего электроснабжения. Представлены различные технические решения, позволяющие повысить надежность работы систем ЧРП. Указаны возможные способы резервирования ПЧ и их отдельных элементов, приведены соответствующие структурные схемы. Предложен вариант использования устройств быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР) как средства осуществления быстрого переключения между основным и резервным вводами при различных отклонениях напряжения сети. Рассмотрена возможность применения статического компенсатора реактивной мощности для управления состояниями вводов в системах, содержащих ПЧ. Представлены особенности вентильно-индукторных двигателей, обладающих повышенной устойчивостью к нарушениям электроснабжения.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, прерывания напряжения, заводские электростанции, ответственные электроприемники, электропривод насосных установок, быстродействующий автоматический ввод резерва, резервирование выпрямителей, частотный преобразователь, статический компенсатор, вентильно-индукторный двигатель.

ВВЕДЕНИЕ

Для осуществления технологического процесса на современных тепловых электростанциях задействовано большое количество вспомогательного оборудования, оснащенного регулируемыми электроприводами. Благодаря высокому уровню развития современной силовой электроники, широкое применение преобразователей частоты для регулируемых электроприводов стало в настоящее время характерной, знаковой чертой.

Особенностью заводских электростанций металлургических производств является активное использование вторичных топливных газов – доменного и коксового. Находясь непосредственно на территории предприятия, такие электростанции приносят существенную экономическую выгоду – вырабатываемая на них электроэнергия оказывается в 2-2,5 раза дешевле покупной, получаемой из внешней энергосистемы [1].

Вспомогательным оборудованием заводских электростанций являются конденсатные, питательные, дренажные, циркуляционные и сетевые насосы, насосы охлаждающей воды, дымососы и дутьевые вентиляторы. Безаварийная и эффективная работа электростанции в целом во многом зависит от надежности электроприводов этих устройств, поэтому некоторые из них, например приводы сетевых и питательных насосов, дымососов и дутьевых вентиляторов котлов, относятся к электроприемникам первой категории надежности, перебои в работе которых недопустимы, поскольку приводят к серьезным повреждениям основного теплотехнического оборудования станции (паровые и газовые взрывы котлов, гидроудары) и нарушениям электро- и теплоснабжения потребителей. В связи с этим ставятся жесткие технологические условия по бесперебойной работе электроприводов вспомогательного оборудования. Например, при прекращении электропитания привода сетевого насоса его частота вращения должна быть восстановлена в течение 4–10 с, а привода тягодутьевого агрегата или дутьевого вентилятора – в течение 3–4 с [2]. Поэтому остро стоит

вопрос о недопустимости прерываний питающего напряжения, что подразумевает, во-первых, повышение надежности электроснабжения ответственных потребителей, а во-вторых, устойчивость преобразователей частотных (ПЧ) к возможным случайным провалам напряжения. Для достижения наибольшей эффективности предлагаемых решений целесообразно использовать технические возможности самих ПЧ.

Известно, что одним из основных способов повышения надежности электроснабжения является резервирование питающих линий. При использовании такого подхода в системах с частотно-регулируемыми электроприводами необходимо учитывать некоторые особенности в их работе. Несмотря на очевидные преимущества ПЧ, такие как широкий диапазон регулирования, высокая экономическая эффективность и удобство эксплуатации, имеют место и недостатки, в число которых входит чувствительность ПЧ к качеству входного напряжения [3]. Это отражается в том, что при различных нарушениях напряжения сети, к которым относятся провалы, перенапряжения и потери напряжения, срабатывает защита ПЧ, причем длительность таких отклонений может составлять всего лишь единицы периодов промышленной частоты сети. Высокая степень чувствительности защит, предусмотренных в частотных преобразователях, как по входу, так и по выходу, необходима, в первую очередь, для сохранения их сложной и дорогостоящей элементной базы, что в особенности касается высоковольтных ПЧ большой мощности.

ВЗАИМОРЕЗЕРВИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ

Одним из возможных вариантов обеспечения бесперебойной работы ответственных потребителей тепловых электростанций является взаиморезервирование ЧРП. В [2] указывается на возможность использования двух ПЧ, питаемых от независимых вводов, для привода двух насосных агрегатов, одновременно находящихся в работе (рис. 1). При отказе первого насоса и падении давления в теплосети автоматически повышается частота вращения двигателя второго насоса и восстанавливается нормальный режим подачи воды.

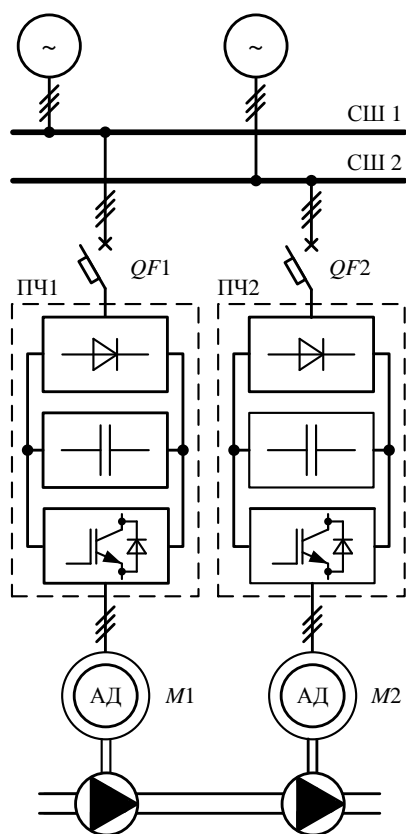


Рис. 1. Схема взаиморезервирования двух ЧРП

Недостатком данного метода является нерациональное энергопотребление, связанное с совместной работой двух недогруженных насосов, и значительные затраты на дорогостоящее оборудование, монтаж и обслуживание, поэтому его широкое применение на практике является сомнительным.

ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО АВР

Другим вариантом повышения надежности ЧРП, при котором отпадает необходимость в использовании двух ПЧ, является питание одного выпрямителя, находящегося в составе ПЧ от двух независимых секций шин. Важным здесь является то, что переключение между основным и резервным вводами должно быть осуществлено в течение единиц периодов частоты питающей сети, что требует применения быстродействующей автоматики и современной коммутационной аппаратуры.

Реализация этих требований может быть осуществлена с применением устройств быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР), которые получают все большее распространение в сетях 6-10 кВ при работе с двигательной нагрузкой (синхронные и асинхронные двигатели).

БАВР состоит из высоковольтных вакуумных выключателей, индукционно-динамических устройств управления приводами этих выключателей (ИДУУ) и быстродействующего микропроцессорного пускового устройства АВР (МБПУ АВР) [4].

Согласно [5], питание ЧРП ответственных потребителей от двух независимых вводов с использованием БАВР может быть осуществлено согласно схеме, представленной на рис. 2.

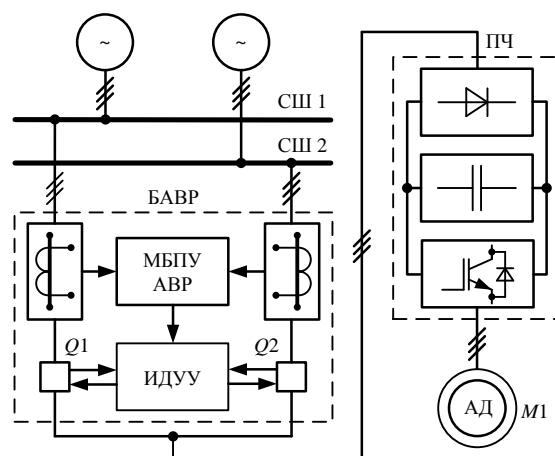


Рис. 2. Схема питания ПЧ от двух независимых вводов с применением БАВР

Современные БАВР, выпускаемые отечественными (ЧЭАЗ, Таврида Электрик) и зарубежными (ABB) производителями, характеризуются небольшой длительностью полного цикла переключения на резервный источник, которая зависит от типа аварийной ситуации в энергосистеме и в среднем составляет от 20 до 60 мс [6-8]. К недостаткам такого подхода можно отнести усложнение схемы электроснабжения и внесение проблем по селективности устройств защиты и загруженности вводов [2].

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ВХОДНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ПЧ

Кроме применения вышеупомянутых методов повышения надежности электроснабжения, бесперебойная работа ЧРП может быть осуществлена с помощью резервирования выпрямителей, входящих в состав одного ПЧ [9-11]. Так, в [9] предлагается питание основного (В1) и резервного (В2) выпрямителей ПЧ от двух независимых секций шин (рис. 3). При провале или потере напряжения на одном из вводов резервный выпрямитель поддерживает заданный уровень напряжения на входе емкостного фильтра, что обеспечивает сохранение работоспособности ЧРП при отклонениях напряжения сети.

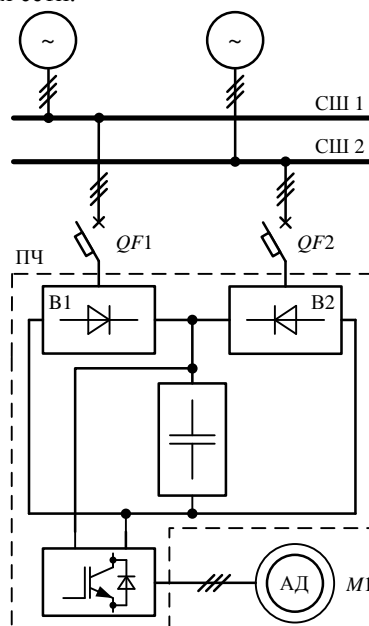


Рис. 3. Схема питания ПЧ с резервированием выпрямителей

Для более равномерного распределения нагрузки между вводами, к которым подключены основной и резервный выпрямители, авторы предлагают техническое решение, описанное в [10, 11] и основанное на применении стабилизирующего устройства – статического компенсатора. Однако применение данного подхода существенно усложняет схему питания ПЧ и требует значительных вложений на его реализацию. В то же время эффективность предложенного решения остается под вопросом.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Помимо различных решений, предполагающих внесение изменений в схемотехнику применяемых ПЧ и совершенствование системы электроснабжения, радикальным методом повышения надежности является внедрение специальных машин переменного тока – вентильно-индукторных двигателей (ВИД) вместо привычных синхронных и асинхронных приводов.

ВИД, особенности которого подробно описаны в [12], представляет собой многосекционную электрическую машину с безобмоточным ротором и независимыми статорными обмотками, каждая из которых питается от собственного ПЧ (рис. 4).

Отметим, что используемые для работы с ВИД преобразователи частоты конструктивно ничем не отличаются от ПЧ, входящих в состав асинхронного и синхронного ЧРП.

Высокая надежность, живучесть, бесперебойность работы таких машин обеспечивается наличием нескольких секций, имеющих независимое электропитание, что делает возможным их применение в качестве регулируемых электроприводов ответственных механизмов. Об этом свидетельствует успешное использование вентильно-индукторных приводов для сетевых насосов на ряде районных теплостанций г. Москвы [12]. Отмечены высокий уровень надежности и уникальная отказоустойчивость таких приводов, что, в целом, оправдывает значительные капитальные вложения на их разработку и внедрение. В настоящее время ведутся работы по созданию новых ВИД, обладающих улучшенными характеристиками и меньшей стоимостью, и совершенствованию систем управления приводами на их основе [13].

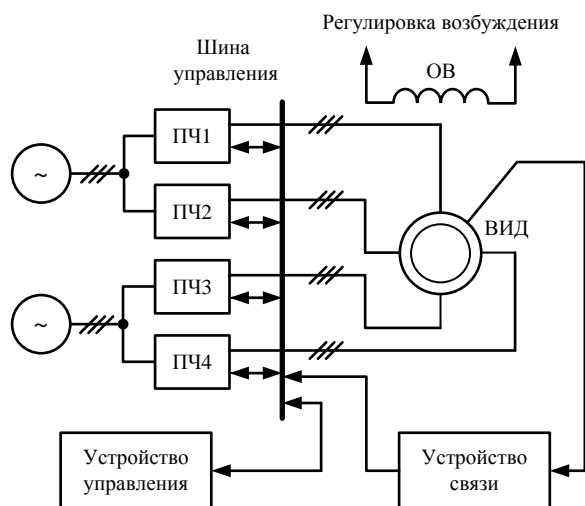


Рис. 4. Схема питания и управления 4-секционного ВИД

Металлургия является одной из базовых отраслей, определяющих уровень экономического состояния страны. Для успешного ее развития и продвижения продукции на мировом и внутреннем рынках, стратегической является задача снижения себестоимости ее продукции. Эта цель достижима за счет внедрения энергосберегающих технологий и уменьшения стоимости электроэнергии. Этому способствует развитие собственной генерации и расширение парка заводских электростанций, работающих на вторичных топливных газах. Залогом успешной работы таких электростанций является в том числе высокий уровень надежности электроприводов, задействованных в технологическом процессе.

Для более детального исследования и получения количественных показателей, предложенных в данной работе технических решений предлагается провести математическое моделирование электротехнических комплексов, оснащенных ЧРП, в различных условиях работы, в том числе с учетом влияния параметров питающей сети [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности электроснабжения металлургического комбината и возможные перспективы его развития / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, О.В. Газизова, Л.А. Копцев // *Металлург*. 2021. № 7. С. 81-89.
2. Энергосбережение в теплотехническом хозяйстве города средствами регулируемого электропривода: монография / Крылов Ю.А., Медведев В.Н., Карандаев А.С., Корнилов Г.П. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 202 с.
3. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения / Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, О.И. Карандаева, А.Р. Губайдуллин, Р.Р. Галлямов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011. №4. С. 79-84.
4. Микропроцессорный быстродействующий АВР как средство повышения надежности электроснабжения ответственных потребителей / С.И. Гамазин, А.В. Битиев, Д.Т. Гумиров, В.А. Жуков, С.А. Цырук, В.М. Пупин // *Проблемы энергетики*. 2006. № 11-12. С. 7-12.
5. Астахов Р.А., Пупин В.М. Применение БАВР в системах электроснабжения насосных станций // *Вестник трубопроводных технологий*. 2019. № 1(3). С. 50-53.
6. Устройство быстродействующего автоматического ввода резерва БАВР-В: техническое описание. URL: https://www.cheaz.ru/assets/images/production/12-garp/4-bavr/tech_28082019.pdf (дата обращения 01.09.2021).
7. Устройство быстродействующего АВР БАВР-10: техническая информация. URL: https://www.tavrida.com/upload/iblock/403/TER_CBdoc_P_G_2.pdf (дата обращения 01.09.2021).
8. Устройство быстродействующего автоматического ввода резерва SUE 3000: техническое описание. URL: <https://library.e.abb.com/public/996716c71c636de2c12578ca0044dfef/DS%20SUE%203000%20Prod-Datenblatt%20RUS.pdf> (дата обращения 01.09.2021).
9. Пат. 32333 Российская Федерация, МПК H02P 5/00. Устройство для регулирования частоты напряжения питания электродвигателей переменного тока / Станкевич С.Н., Крылов Ю.А.; заявитель ООО «Научно-производственная фирма «Эксперт». № 2003102722/20, заявл. 04.02.2003, опубл. 10.09.2003.
10. Пат. 110877 Российская Федерация, МПК H02J9/06.

- Преобразователь частоты для электропривода непрерывного действия / Карандаев А.С., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., Корнилов Г.П., Николаев А.А., Ровнейко В.В., Галлямов Р.Р.; заявитель ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2011130079/07, заявл. 19.07.2011, опублик. 27.11.2011.
11. Пат. 120294 Российская Федерация, МПК H02M5/40. Преобразователь частоты для электропривода непрерывного действия / Карандаев А.С., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., Корнилов Г.П., Мурзинов А.А., Медведев В.Н.; заявитель ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2012116730/07, заявл. 24.04.2012, опублик. 10.09.2012.
12. Вентильно-индукторный привод – перспективное направление развития современного регулируемого электропривода / В.Ф. Козаченко, А.М. Русаков, А.В. Сорокин, Ю.И. Кочанов, А.А. Ионов, Д.В. Тарасов // Новости теплоснабжения. 2011. № 11(135). С. 21-28.
13. Корнеев А.А., Третьяков А.С., Капитонов О.А. Перспективы развития вентильно-индукторного привода // Вестник Белорусско-Российского университета. 2018. № 3(60). С. 63-69.
14. Моделирование электротехнических комплексов металлургических предприятий: учебное пособие / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Мурзинов А.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 235 с.

Поступила в редакцию 30 сентября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE CRITICAL ELECTRIC DRIVES RELIABILITY AT INDUSTRIAL POWER PLANTS OF METALLURGICAL ENTERPRISES

Konstantin E. Odintsov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, eltech_mgtu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0699-6016>

Mikhail Yu. Petushkov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of electronics and microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, m.petushkov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5634-2523>

Evgeniy F. Ivanov

Postgraduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, ivanov.ef@mmk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5207-2810>

Aleksey A. Bochkarev

Student, Automated Electrical Drive and Mechatronics Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Eanalogsynth@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8834-2384>

Maxim M. Lygin

Postgraduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, eligin@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8884-4846>

The distinguishing feature of domestic metallurgical enterprises is the on-site power plants using secondary fuel gases as fuel, in particular, blast furnace and coke oven gases. Such power plants have a relatively complex system of in-house needs, an integral part of which are various electric drives, including variable frequency drives (VFD). Frequency converters (FC), which are the distinctive link of the specified electric drive systems, have certain technical features that must be considered in the design and operation process. The article considers the issue of providing the stable VFD operation of on-site power plants at metallurgical enterprises in case of external power supply interruptions. Various technical solutions are presented to improve the reliability of VFD systems. Possible ways of the FC and their individual parts backup are shown, the corresponding structural diagrams are given. It is proposed to use high-speed automatic transfer switch devices (high-speed ATS) as a means of implementing fast switching between the main and reserve inputs at various interruptions of the mains voltage. The possibility of using a static varcompensator for controlling the

inputs state in systems which contain FC is considered. The features of the switched reluctance motors with increased stability to power supply disturbances are presented.

Keywords: reliability of power supply, voltage interruptions, industrial power plants, reliable electrical receivers, electric drive of pumps, high-speed ATS, rectifiers backup, frequency converter, static var compensator, switched reluctance motor.

REFERENCES

1. Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Gazizova O.V., Koptsev L.A. Power Supply Features of Metallurgical Iron-and-Steel Works and Possible Development Prospects. *Metallurg* [Metallurgist], 2021, no. 7, pp. 81-89. (In Russian)
2. Krylov Yu.A., Medvedev V.N., Karandaev A.S., Kornilov G.P. *Energoberezhenie v teplotekhnicheskoy khozyaystve goroda sredstvami reguliruemogo elektroprivoda* [Energy Saving in the Municipal Heat Engineering Economy by Means of a Regulated Electric Drive]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2012. 202 p. (In Russian)

3. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Karandaeva O.I., Gubaidullin A.R., Gallyamov R.R. Ways to Increase the Frequency-Controlled Electric Drive Stability in Case of Power Supply Disturbances. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Bulletin of NMSTU], 2011, no. 4, pp. 79-84. (In Russian)
4. Gamazin S.I., Bitiev A.V., Gumirov D.T., Zhukov V.A., Tsyruk S.A., Pupin V.M. Microprocessor-Based High-Speed ATS as a Means of Increasing Power Supply Reliability to Essential Services. *Problemy energetiki* [Energy Sector Problems], 2006, no. 11-12, pp. 7-12. (In Russian)
5. Astakhov R.A., Pupin V.M. High-Speed ATS Application in Power Supply Systems of Pumping Stations. *Vestnik truboprovodnyh tekhnologiy* [Bulletin of Pipe-Wire Technologies], 2019, no. 1(3), pp. 50-53. (In Russian)
6. *Ustroystvo bystrodeystvuyushchego avtomaticheskogo vvoda rezerva BAVR-V: tekhnicheskoe opisaniye* (High-speed Automatic Transfer Switch BAVR-V: technical description). Available at: https://www.cheaz.ru/assets/images/production/12-garp/4-bavr/tech_28082019.pdf. (accessed 01 September 2021). (In Russian)
7. *Ustroystvo bystrodeystvuyushchego AVR BAVR-10: tekhnicheskaya informatsiya* (Device of High-Speed ATS BAVR-10: technical description). Available at: https://www.tavrida.com/upload/iblock/403/TER_CBdoc_P_G_2.pdf. (accessed 01 September 2021). (In Russian)
8. *Ustroystvo bystrodeystvuyushchego avtomaticheskogo vvoda rezerva SUE 3000: tekhnicheskoe opisaniye* (Device of High-Speed Automatic Transfer Switch SUE 3000: technical description). Available at: [https://library.e.abb.com/public/996716c71c636de2c12578ca0044dfeb/DS%20SUE%203000%20Prod-](https://library.e.abb.com/public/996716c71c636de2c12578ca0044dfeb/DS%20SUE%203000%20Prod-Datenblatt%20RUS.pdf)
9. Stankevich S.N., Krylov Yu.A. *Ustroystvo dlya regulirovaniya chastoty napryazheniya pitaniya elektrodvigatelye peremennogo toka* [A Device for Regulating the Frequency of the Supply Voltage of AC Electric Motors]. Patent RF, no. 32333, 2003.
10. Karandaev A.S., Khramshin T.R., Khramshin R.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Rovneiko V.V., Gallyamov R.R. *Preobrazovatel chastoty dlya elektroprivoda nepreryvnogo deystviya* [Frequency Converter for Continuous Electric Drive]. Patent RF, no.110877, 2011.
11. Karandaev A.S., Khramshin T.R., Khramshin R.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Medvedev V.N. *Preobrazovatel chastoty dlya elektroprivoda nepreryvnogo deystviya* [Frequency Converter for Continuous Electric Drive]. Patent RF, no. 120294, 2012.
12. Kozachenko V.F., Rusakov A.M., Sorokin A.V., Kochanov Yu.I., Ionov A.A., Tarasov D.V. Switched Reluctance Drive as a Promising Direction of a Modern Controlled Electric Drive Development. *Novosti teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], 2011, no. 11(135), pp. 21-28. (In Russian)
13. Korneev A.A., Tretyakov A.S., Kapitonov O.A. Prospects of the Switched Reluctance Drive Development. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2018, no. 3(60), pp. 63-69. (In Russian)
14. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R., Murzikov A.A. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh kompleksov metallurgicheskikh predpriyatiy* [Modeling of Electrotechnical Complexes for Metallurgical Enterprises]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2012. 202 p. (In Russian)

Способы повышения надежности ответственных электроприводов заводских электростанций металлургических производств / К.Э. Одинцов, М.Ю. Петушков, Е.Ф. Иванов, А.А. Бочкарев, М.М. Лыгин // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 28-32. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-28-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-28-32)

Odintsov K.E., Petushkov M.Yu., Ivanov E.F., Bochkarev A.A., Lygin M.M. Improving the Critical Electric Drives Reliability at Industrial Power Plants of Metallurgical Enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 28-32. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-28-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-28-32)

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В УСЛОВИЯХ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

В статье приводится техническое решение для повышения достоверности диагностирования силовых трансформаторов в условиях сезонных изменений температуры. Особенностью системы электроснабжения железнодорожного транспорта является расположение тяговых подстанций вдоль железнодорожного пути. Эксплуатация силовых трансформаторов осуществляется в открытых условиях. Показано, что для диагностирования силовых трансформаторов целесообразно использовать переносные комплексы на основе акустического контроля частичных разрядов благодаря их высокой мобильности и относительной простоте установки. Для повышения достоверности диагностирования в условиях сезонных изменений температуры предложено использовать имитатор дефектов и дифференциальный способ измерения параметров частичных разрядов. Предложены схема проведения экспериментов и структурная схема имитатора дефектов. Приведены выражения, описывающие распространение акустических волн при изменении температуры и, соответственно, свойств трансформаторного масла. Приводятся данные диагностирования, полученные на силовых трансформаторах системы электроснабжения железных дорог, показывающие возможные случаи пропуска дефектов и их выявление при использовании предложенного имитатора дефектов.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, акустический контроль, частичные разряды, изменения температуры, свойства масла, распространение волн, повышение достоверности, имитатор дефектов.

ВВЕДЕНИЕ

Силовые трансформаторы (СТ) являются основным оборудованием в системе электроснабжения железных дорог. Срок службы СТ зависит от состояния изоляции внутри маслонаполненного бака. Старение изоляции внутри бака СТ происходит из-за электрических, механических и термических нагрузок. Последствия этих нагрузок приводят к возникновению частичных разрядов (ЧР) внутри СТ, что может привести к его аварийному отключению.

Для осуществления непрерывного контроля состояния силовых трансформаторов в системе электроснабжения железных дорог используются различные методики и технические средства. Применение акустических методов отличается повышенным быстродействием и информативностью [1]. Использование приборов акустического контроля существенно повышает достоверность и временные характеристики широко применяемого хроматографического метода диагностирования силовых трансформаторов.

Вместе с тем к основным задачам дальнейшего совершенствования акустических методов при контроле силовых трансформаторов можно отнести распознавание вида контролируемого дефекта, его развитие во времени и локацию места его положения.

Особенностью системы электроснабжения железнодорожного транспорта является расположение тяговых подстанций вдоль железнодорожного пути. Эксплуатация силовых трансформаторов осуществляется в открытых условиях. Показано, что для диагностирования силовых трансформаторов целесообразно использовать переносные комплексы на основе акустического контроля частичных разрядов благодаря их высокой мобильности и относительной простоте установки.

Современные автоматизированные системы аку-

стического контроля со встроенным программным обеспечением позволяют регистрировать частичные разряды, определять их количество в единицу времени, амплитуды и форму отдельных сигналов, другие параметры. По разности времен прихода сигналов к датчикам акустической антенны, располагаемых в местах наибольшего сигнала на корпусе трансформатора, возможно установление координат предполагаемого дефекта и его вида [2].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В статье предложено устройство для определения дефектов изоляции силовых трансформаторов по наличию частичных разрядов, регистрируемых акустическим методом с использованием имитатора дефектов. Для повышения достоверности определения дефектов, их развития во времени предложено использование имитатора дефектов. Выполнение измерений в различное время года (зима, весна, лето, осень), сопровождающихся сезонными изменениями температуры, приводит к дополнительным погрешностям, связанным с изменением свойств трансформаторного масла [3, 4].

Проведенный анализ отечественной [5, 6] и зарубежной [7-9] литературы выявил наличие большого количества работ, посвященных методам и способам диагностирования высоковольтного оборудования.

Основная сложность применяемых акустических методов при контроле трансформаторов и другого высоковольтного оборудования связана с распознаванием вида контролируемого дефекта и локацией места его положения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Основная идея использования имитатора дефектов заключается в одновременных измерениях сигналов на СТ и имитаторе дефектов [4]. Если при изменении температуры значение опорного напряжения на

имитаторе дефектов не изменяется, следовательно, дефект не развивается во времени, а увеличение амплитуды связано с изменениями свойств трансформаторного масла. Если при изменении параметров акустического сигнала наблюдается увеличение опорного напряжения на имитаторе дефектов при сезонном изменении температуры, то наблюдается развитие дефекта диагностируемого СТ.

При использовании имитатора дефектов повышается достоверность диагностирования дефектов и динамики их изменения методом регистрации ЧР при сезонных изменениях температуры для СТ, находящихся в эксплуатации на открытом воздухе вне производственных помещений.

Технический результат, обеспечивающий решение поставленной задачи, заключается в уменьшении вероятности определения ложных дефектов путем использования в процессе диагностирования имитатора дефектов, использования дифференциального метода измерений, совместной обработки параметров частичных разрядов, полученных на диагностируемом СТ и имитаторе дефектов при одинаковой температуре трансформаторного масла на обоих объектах.

Предлагаемое устройство для мониторинга СТ содержит блок измерения температуры обмоток, блок цифровой акустической диагностики, акустические измерительные преобразователи, блок расчетных моделей, блок визуализации контролируемых параметров трансформатора.

При этом на бак СТ устанавливаются акустические преобразователи, выходы которых соединены со входами блока цифровой акустической диагностики, выход блока цифровой акустической диагностики подключен ко входу блока расчетных моделей (БРМ), к другому входу БРМ подключен выход блока измерения температуры обмоток СТ. Выход блока расчетных моделей подключен ко входу блока визуализации контролируемых параметров трансформатора (БВКП).

Для компенсации температурных погрешностей, вызванных сезонными изменениями температуры, изменениями вязкости и коэффициента затухания при распространении акустических волн и, как следствие, уменьшением амплитуды, частотных характеристик, формы сигнала, дополнительно введен блок имитатора дефектов, содержащий регулируемый блок питания постоянного тока, электронный коммутатор, генератор тактовых импульсов, повышающий трансформатор, маслонаполненный бак, электрический разрядник, блок контроля температуры имитатора дефектов, блок поддержания температуры в маслонаполненном баке.

На **рис. 1** представлена схема устройства для регистрации параметров частичных разрядов на силовом трансформаторе с применением имитатора дефектов.

Предлагаемое устройство для регистрации параметров ЧР на СТ с применением имитатора дефектов (**рис. 1**) содержит: силовой трансформатор (СТ) 1; блок имитатора дефектов (ИД) 2, состоящий из регулируемого блока питания постоянного тока (БП) 3, электронного коммутатора (ЭК) 4, генератора тактовых импульсов (ГТИ) 5, повышающего трансформатора (ПТ) 6; маслонаполненного бака (МБ) 7, электрическо-

го разрядника (ЭР) 11, блока контроля температуры имитатора дефектов 8; блок поддержания температуры в маслонаполненном баке 13; блок измерения температуры обмоток СТ 9; блок цифровой акустической диагностики (БЦАД) 10; акустические измерительные преобразователи 12; блок расчетных моделей (БРМ) 14; блок визуализации контролируемых параметров трансформатора (БВКП) 15.

На **рис. 2** приведена схема расположения электрического разрядника в маслонаполненном баке ИД. На **рис. 3** приведена схема расположения преобразователей акустических и электрического разрядника на верхней крышке маслонаполненного бака ИД.

Поддержание температуры масла в ИД, равной температуре масла диагностируемого СТ, осуществляется блоком поддержания температуры в маслонаполненном баке 13.

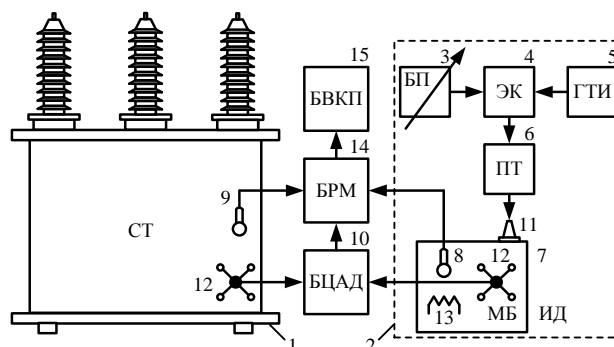


Рис. 1. Схема устройства для регистрации параметров частичных разрядов на силовом трансформаторе с применением имитатора дефектов

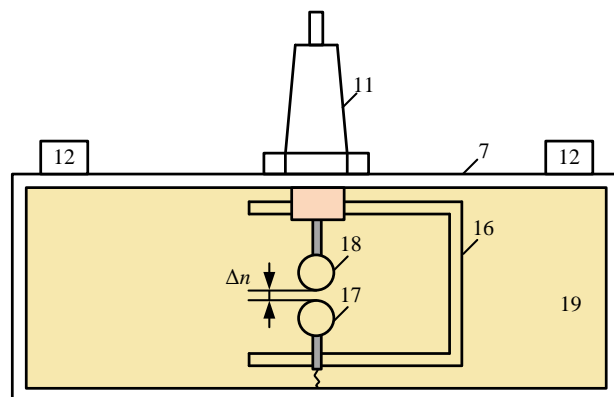


Рис. 2. Схема расположения электрического разрядника в маслонаполненном баке

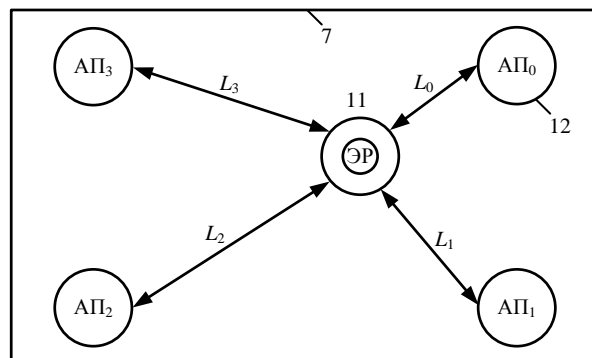


Рис. 3. Схема расположения акустических преобразователей и электрического разрядника на верхней крышке маслонаполненного бака

Устройство для мониторинга силовых трансформаторов (см. **рис. 1**) работает следующим образом. Все основные рабочие параметры силового трансформатора измеряют и контролируют с помощью блоков измерения первичных параметров.

Блок цифровой акустической диагностики БЦАД 10 обеспечивает акустический контроль и непрерывную фиксацию интенсивности частичных разрядов, а также амплитуду, фазу и пространственные координаты каждого импульса. С помощью встроенного программного обеспечения осуществляется обработка информации об интенсивности, амплитудах, фазах и пространственных координатах частичных разрядов, по результатам которой определяются участки с наибольшей разрядной активностью. Поскольку частичные разряды являются признаками деструктивных процессов в изоляции, это позволяет оперативно локализовать место возникновения неисправности в объемном пространстве бака трансформатора.

Более подробно методика локализации частичных разрядов описана в работе [1]. На приведенных объемных схемах локализации показаны изменения координат участков с повышенной интенсивностью разрядных явлений в течение шести месяцев. Анализ пространственного перемещения данных центров, а также динамики изменения разрядной активности позволяет выполнять оценку интенсивности развития деструктивных процессов в изоляции в реальном времени.

Блок расчетных моделей 14 по данным измерений в реальном масштабе времени на основе информации от первичных преобразователей [2], блока измерения температуры обмоток СТ 9, блока цифровой акустической диагностики (БЦАД) 10 осуществляет вычисление срока службы силового трансформатора и скорости старения изоляции.

Блок визуализации контролируемых параметров 15 обеспечивает оператору возможность удобной работы с текущими, архивными и полученными расчетным путем значениями рабочих параметров в виде таблиц и/или графиков, что позволяет своевременно отследить возникновение предаварийной или аварийной ситуации и принять меры по предотвращению и/или устранению такой ситуации. Диагностическая информация сохраняется длительное время и позволяет делать выводы о развитии дефектов.

Применение имитаторов дефектов в системах акустического контроля описано в работах [2, 6], их применение в основном предназначено для калибровки измерительных каналов.

Предлагаемый имитатор дефектов 2 позволяет воспроизводить импульсы частичных разрядов, аналогичные импульсам, зарегистрированным от дефектов диагностируемого трансформатора с различной амплитудой, фазой и частотой следования. При реализации дифференциального метода измерений на первом этапе регистрируют импульсы частичных разрядов на диагностируемом СТ 1 при помощи акустических датчиков 12, затем эти датчики переносят на маслонеполненный бак 7 в составе ИД, и регистрируют частичные разряды, сформированные электрическим разрядником 11. ЭР 11 установлен на крышке масло-наполненного бака 7 таким образом (**рис. 2**), что разрядники 17 и 18

находятся в трансформаторном масле 19, а промежутки между ними может регулироваться при помощи кронштейна 16. На регулируемом блоке питания постоянного тока (БП) 3 устанавливают напряжение, соответствующее порогу возникновения частичных разрядов. Это напряжение подается на электронный коммутатор 4, который управляется генератором тактовых импульсов 5 с частотой, соответствующей частоте следования ЧР на диагностируемом СТ 1. С выхода повышающего трансформатора 6 на электрический разрядник 11 поступают высоковольтные импульсы, вызывающие ЧР. При помощи регулирования опорного напряжения на БП добиваются одинаковой амплитуды ЧР, зарегистрированной на ВТ и ИД, и запоминают это значение.

При сезонных изменениях температуры масло в силовых трансформаторах, эксплуатируемых на открытом воздухе, изменяет свои свойства. Изменяется вязкость масла [3], а следовательно, изменяются коэффициенты фазы и затухания при распространении акустических волн [10], что, в свою очередь, влияет на параметры акустических импульсов, регистрируемых измерительной аппаратурой.

Как показано в работе [10], комплексное волновое число распространения акустической волны описывается выражением

$$k^2 = \frac{\omega^2}{V_l^2 + j \frac{\omega b}{\rho_0}}, \quad (1)$$

где k – волновое число, 1/м; ω – круговая частота, 1/с; V_l – скорость распространения акустической волны в среде, м/с; b – эффективный коэффициент вязкости; ρ_0 – удельная плотность среды, кг/м³.

При условии, что если $b\omega/\rho_0 V_l^2 \ll 1$, что соответствует малому затуханию звука на расстоянии порядка длины волны, комплексное волновое число

$$k = \sqrt{\frac{\omega^2}{V_l^2} \left[1 - j \frac{\omega b}{\rho_0 V_l^2} \right]} \cong \frac{\omega}{V_l} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\omega b}{\rho_0 V_l^2} \right) = k - j\alpha. \quad (2)$$

Вещественная составляющая постоянной распространения, 1/м:

$$k = \frac{\omega}{V_l}, \quad (3)$$

представляет собой коэффициент фазы, позволяющий рассчитать изменение длины волны, а мнимая часть α – коэффициент затухания, 1/м, который можно вычислить по формуле

$$\alpha = \frac{b\omega^2}{2\rho_0 V_l^3} = \frac{\omega^2}{2\rho_0 V_l^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \eta' + x \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right], \quad (4)$$

где η – коэффициент сдвиговой (поперечной) вязкости, Па·с; η' – коэффициент объемной вязкости, Па·с; x – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c_v – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, Дж/(кг·К); c_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К).

Здесь b – эффективный коэффициент вязкости:

$$b = \frac{4}{3} \eta + \eta' + x \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right). \quad (5)$$

Основной причиной затухания акустических волн является сила вязкого сопротивления между соседними частицами среды, обладающими различными скоростями, она учитывается первым слагаемым в выражении (4).

В связи с вышеизложенным увеличение амплитуды импульсов, вызванных частичными разрядами в СТ при сезонном изменении температуры, можно ложно принять за нарастание дефекта. Применение имитатора дефектов позволяет избежать подобных ошибок. При выполнении измерений при одинаковых температурах масла СТ и ИД дополнительно регистрируют опорное напряжение на выходе БП 3 и опорную частоту ГТИ 5. При условии равенства амплитуд зарегистрированных ЧР, если не происходит увеличения опорного напряжения, делают вывод, что дефект не увеличивается.

В **таблице** приведен пример данных диагностирования при сезонных изменениях температуры от +20°C до -10°C.

При диагностировании СТ с использованием имитатора дефектов регистрируется опорное напряжение БП. Во втором и третьем столбце наблюдается увеличение амплитуды ЧР при сезонном изменении температуры от 100 до 150 ед. АЦП, однако оба значения зарегистрированы при одинаковом значении $U_{оп} = 5,5$ В, что позволяет считать, что энергия высоковольтных импульсов, вызывающих ЧР, остается постоянной, следовательно, увеличения дефектов не наблюдается, а повышение амплитуды связано с сезонным изменением температуры и изменением свойств трансформаторного масла.

Во втором и четвертом столбцах наблюдается увеличение амплитуды ЧР при сезонном изменении температуры от 100 до 150 ед. АЦП, однако эти значения зарегистрированы при разных значениях $U_{оп1} = 5,5$ В и $U_{оп2} = 6,8$ В, что позволяет считать, что энергия высоковольтных импульсов, вызывающих ЧР, увеличивается, следовательно, наблюдается увеличение дефекта изоляции СТ, и повышение амплитуды связано в первую очередь с увеличением дефекта и в меньшей степени с изменением свойств трансформаторного масла.

Сравнение сигналов на силовом трансформаторе и имитаторе дефектов при сезонных изменениях температуры

Силовой трансформатор			
Амплитуда, ед. АЦП	100	150	150
Частота, кГц	200	150	150
Длительность, мкс	300	20	20
Температура, °С	+20	-10	-10
Имитатор дефектов			
Опорное напряжение, В	5,5	5,5	6,8
Амплитуда, ед. АЦП	100	150	150
Частота, кГц	200	150	150
Длительность, мкс	30	20	20
Температура, °С	+20	-10	-10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведено описание устройства имитатора дефектов, предназначенного для генерации сигналов, аналогичных регистрируемым акустическим сигналам в системах диагностирования высоковольтного маслонаполненного оборудования на примере силовых трансформаторов. Предлагаемый имитатор дефектов целесообразно использовать с современными системами диагностирования СТ, в составе которых имеются блоки акустического контроля.

Повышение достоверности контроля состояния трансформатора подтверждается при сезонных изменениях температуры. Выполняются одновременные измерения сигналов на СТ и имитаторе дефектов. На данных натуральных измерений было показано – если при изменении температуры значение опорного напряжения на имитаторе дефектов не изменялось, означало что, дефект не развивался во времени, а увеличение амплитуды было связано с изменениями свойств трансформаторного масла. В случае, когда при изменении параметров акустического сигнала наблюдалось увеличение опорного напряжения на имитаторе дефектов при сезонном изменении температуры, означало, что наблюдается развитие дефекта диагностируемого СТ.

В доказательство приведенных натуральных измерений приведены зависимости коэффициентов распространения и затухания акустических волн при их распространении. При этом для сезонных изменений температуры изменяется коэффициент вязкости трансформаторного масла, что приводит к изменениям амплитуды и формы регистрируемых акустических сигналов. Поэтому для выявления развивающихся дефектов необходимо выполнять сравнение сигналов от силового трансформатора и имитатора дефектов, вырабатывающих сигналы с различной дозированной мощностью.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90231.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика диагностирования силовых трансформаторов на основе кластерной обработки акустических сигналов / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, С.Л. Цемошевич, С.Е. Мостовой, А.В. Ануфриев, А.А. Сарлыбаев // Известия вузов. Электромеханика. 2011. №4. С. 86-90.
2. Пат. 2370784 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ определения места локализации и вида дефектов в активной части электрической машины, находящейся в рабочем режиме / Аксенов Ю.П., Прошлецов А.П.; заявитель Аксенов Юрий Петрович. № 2008108297/28, заявл. 05.03.2008, опубл. 20.10.2009.
3. ГОСТ 982-80. Масла трансформаторные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2011. 7 с.
4. Измерение параметров акустических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов / В.Т. Черемисин, А.А. Кузнецов, М.А. Волчанина, А.В. Горлов // Транспортные системы и технологии. 2020. № 6(4). С. 161-171. doi: 10.17816/transsyst202064161-171
5. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, Р.А. Леднов // Машиностроение: се-

- тевой электронный научный журнал. 2013. № 1(2). С. 58-68.
6. Пат. 2615790 С1 Российская Федерация, МПК H02H 7/04. Устройство для мониторинга силовых трансформаторов / Храмшин В.Р., Карандаев А.С., Храмшин Р.Р., Евдокимов С.А., Сарлыбаев А.А., Николаев А.А.; заявитель ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2016102967, заявл. 29.01.2016, опубл. 11.04.2017.
 7. Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements / I.B.M. Taha, S.S. Dessouky, R.N.R. Ghaly, S.S.M. Ghoneim // Alexandria Engineering Journal. 2020. № 59(6). Pp. 4759-4769. doi: 10.1016/j.aej.2020.08.041
 8. Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers / S.M. Strachan, S. Rudd, S.D.J. McArthur, M.D. Judd, S. Meijer, E. Gulski // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008. № 15(1). Pp. 259-268. doi: 10.1109/T-DEI.2008.4446759
 9. Markalous S.M., Tenbohlen S., Feser K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008. №15 (6). Pp. 1576-1583. doi: 10.1109/TDEI.2008.4712660
 10. Соловьянова И.П., Шабунин С.Н. Теория волновых процессов. Акустические волны. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2004. 142 с.

Поступила в редакцию 10 ноября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INCREASING THE RELIABILITY OF POWER TRANSFORMERS DIAGNOSING UNDER SEASONAL TEMPERATURE CHANGES

Maria A. Volchanina

Postgraduate Student, Department of Electrical Machines and General Electrical Engineering, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, kuznetcova994@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3757-5580>

Andrey A. Kuznetsov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, KuznetsovAA@omgups.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1815-4679>

Anton V. Gorlov

Postgraduate Student, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, anton.gorlov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8413-661>

The article provides a technical solution to improve the reliability of power transformers diagnosing in conditions of seasonal temperature changes. A feature of the railway transport power supply system is the location of traction substations along the railway track. Operation of power transformers is carried out in open conditions. It is shown that for diagnosing power transformers, it is advisable to use portable systems based on acoustic monitoring of partial discharges due to their high mobility and relative ease of installation. To improve the reliability of diagnostics in conditions of seasonal temperature changes, it is proposed to use a defect simulator and a differential method for measuring the parameters of partial discharges. A scheme for carrying out experiments and a structural diagram of a defect simulator are proposed. Expressions are given that describe the propagation of acoustic waves with a change in the temperature, and, accordingly, the properties of transformer oil. The data of diagnostics obtained on power transformers of the railway power supply system are presented showing possible cases of defects and their identification when using the proposed defect simulator.

Keywords: power transformers, acoustic control, partial discharges, temperature changes, oil properties, wave propagation, reliability enhancement, defect simulator.

REFERENCES

1. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Tsemoshevich S.L., Mostovoy S.E., Anufriev A. V., Sarlybaev A.A. Methodology for diagnosing power transformers based on cluster processing of acoustic signals. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. [Russian Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 86-90. (In Russian)
2. Aksenov Yu.P., Proshletsov A.P. *Sposob opredeleniya mesta lokalizatsii i vida defektov v aktivnoy chaste elektricheskoy mashiny, nakhodyashcheyся v rabochem rezhime* [A method for determining the location and type of defects in the active part of an electrical machine in operating mode]. Patent RF, no. 2370784, 2009.
3. GOST R 982-80–2011. Transformer oils. Specifications. Moscow, STANDARTINFORM Publ., 2011. 7 p. (In Russian)
4. Cheremisin V.T., Kuznetsov A.A., Volchanina M.A., Gorlov A.V. Measuring the acoustic signals parameters of the defect simulator of power transformers. *Transportnyye sistemy i tekhnologii* [Transportation systems and technologies], 2020, no. 6(4), pp. 161-171. doi: 10.17816/transsyst202064161-171. (In Russian)
5. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Lednov R.A. Requirements for the system for monitoring the technical condition of the transformer of a heavy-duty steel arc furnace. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 1(2), pp. 58-68. (In Russian)
6. Khrumshin V.R., Karandaev A.S., Khrumshin R.R., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Nikolaev A.A. *Ustroystvo dlya monitoringa silovykh transformatorov* [Power transformer monitoring device]. Patent RF, no. 2615790 C1, 2017.
7. Ibrahim B.M. Taha, Sobhy S. Dessouky, Ramy N.R. Ghaly, Sherif S.M. Ghoneim. Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements. *Alexandria Engineering Journal*. 2020, vol. 59(6), pp. 4759-4769. doi: 10.1016/j.aej.2020.08.041
8. SM Strachan, S Rudd, SDJ McArthur, MD Judd, S Meijer, E Gulski. Knowledge-based diagnosis of partial discharges

- in power transformers. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008, vol. 15(1), pp. 259-268. doi:10.1109/t-dei.2008.4446759
9. S.M. Markalous, S. Tenbohlen, K. Feser. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008, vol. 15(6), pp. 1576-1583. doi: 10.1109/tdei.2008.4712660
10. Solovyanova I.P., Shabunin S.N. Teoriya volnovykh protsessov. Akusticheskie volny [The theory of wave processes. Acoustic waves]. Yekaterinburg, Ural State Technical University Publ., 2004. 142 p. (In Russian)
-
- Волчанина М.А., Кузнецов А.А., Горлов А.В. Повышение достоверности диагностирования силовых трансформаторов в условиях сезонных изменений температуры // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 33-38. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-33-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-33-38)
- Volchanina M.A., Kuznetsov A.A., Gorlov A.V. Increasing the Reliability of Power Transformers Diagnosing under Seasonal Temperature Changes. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 33-38. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-33-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-33-38)
-

Брякин И.В.¹, Бочкарев И.В.², Храмшин В.Р.³

¹Институт машиноведения и автоматике Национальной Академии Наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызская Республика

²Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызская Республика

³Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ЭЛЕКТРОДНО-ИНДУКТИВНЫЙ ВИБРОДАТЧИК С ЕМКОСТНОЙ СВЯЗЬЮ

Проведен анализ систем виброакустической диагностики. Получено, что наибольший практический интерес представляют датчики вибрационных ускорений (акселерометры) из класса электромагнитных преобразователей, предназначенные для измерения низкочастотных динамических процессов. Предложен новый вариант электродно-индуктивного датчика виброускорения соленоидного типа с упругим подвесом инерционного элемента для измерения низкочастотных динамических процессов. Представлены вариант конструктивного исполнения вибродатчика и его электрическая схема замещения, а также рассмотрен принцип работы вибродатчика. Информативным параметром датчика, на который воздействуют внешние механические колебания, является величина глубины введения якоря-плунжера в полость его измерительной катушки. Для обработки измерительной информации используется мостовая схема, причем в качестве вспомогательных плечевых элементов этой схемы используются емкостные элементы, являющиеся составной частью конструкции самого датчика, что обеспечивает высокий уровень инвариантности к дестабилизирующим факторам. При этом используется резонансный режим возбуждения измерительных катушек, что обеспечивает высокую чувствительность датчика в целом. Выполнено аналитическое описание основных физических процессов, которые определяют новизну рассматриваемого технического решения. Предложено использовать дополнительное преобразование информационного сигнала с датчика в виде квадратурного детектирования посредством синхронного детектора

Ключевые слова: вибродатчик, измерительная катушка, инерционный элемент, упругий подвес, межвитковая емкость обмотки, конденсаторы связи измерительных катушек с напряжением питания, мостовая измерительная схема, резонанс, квадратурное детектирование.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы виброакустической диагностики диктуется острой необходимостью организации оперативного безразборного контроля технического состояния машин и механизмов на протяжении всего жизненного цикла от этапов изготовления и эксплуатации, до этапов ремонта и модернизации [1–5].

Анализ отечественного и зарубежного опыта контроля технического состояния систем с вращательным движением силовых узлов показывает, что для обнаружения возможных отказов наиболее эффективен (до 77%) контроль состояния оборудования именно по параметрам механических колебаний [6–10].

Ориентация на методы виброакустической диагностики, базирующейся именно на принципах безразборности, оперативности и универсальности, позволяет успешно решать поставленные задачи благодаря огромной информационной емкости виброакустических процессов, сопровождающих функционирование машин и механизмов [11–13]. Поэтому работы, направленные на улучшение качества вибродиагностики, являются весьма актуальными и имеют высокую практическую значимость.

АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ВИБРОДАТЧИКОВ

Любая система диагностирования с функциональной точки зрения является двухуровневой и состоит фактически из первичной и вторичной подсистем (рис. 1). Первичная подсистема предназначена для сбора информации и регистрации ее на соответствующих физических носителях информации. Она состоит из датчиков колебаний, регистрирующих вибрацию

объекта контроля и преобразующих их в электрический сигнал, различного типа согласующих устройств, усилителей, а также может содержать блоки специализированной обработки информации (фильтрации, стробирования, синхронного накопления, детектирования и т.п.). Вторичная подсистема предназначена для ввода и обработки информации, поступающей с первичной системы, например, переводит ее в цифровой вид, и может включать в себя как ЭВМ, так и набор модулей аналогово-цифровой аппаратуры.

Эффективность диагностирования в основном зависит от качества информации, снимаемой с объекта диагностирования и преобразуемой первичной подсистемой диагностирования, т.е. фактически от выбора датчиков, мест их установки, режимов диагностирования, способов предварительной обработки измерительной информации [14–17].

Как указывалось, неотъемлемой частью первичной подсистемы диагностирования являются датчики колебаний, преобразующие различные механические величины (виброскорость, виброперемещения и виброускорения) в электрические. При измерении параметров вибрации широко используются пьезоэлектрические, электромагнитные и емкостные вибропреобразователи.

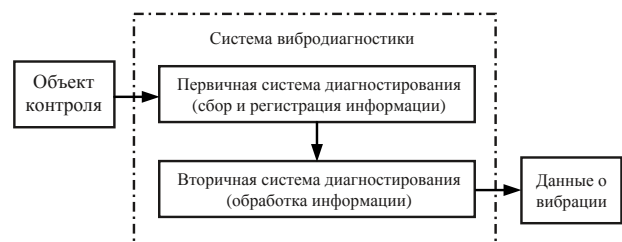


Рис. 1. Функциональная схема системы вибродиагностики

В настоящее время для измерения параметров вибрации в основном используются три типа датчиков: 1 – акселерометры (для измерения виброускорения); 2 – велосиметры (для измерения виброскорости); 3 – проксиметры (для измерения виброперемещений).

При диагностировании машин и оборудования вибрацию разделяют на низкочастотную, среднечастотную, высокочастотную и ультразвуковую. Это обусловлено тем, что в каждой области частот вибрация имеет свои физические особенности, оказывающие значительное влияние на выбор вибродиагностических параметров и методов диагностирования. Особое внимание специалисты уделяют низкочастотной вибрации, особенностью которой являются колебания контролируемого оборудования или его элементов под действием вынуждающей силы как единого целого. Кроме того, низкочастотная вибрация различного типа оборудования содержит преимущественно гармонические составляющие, создаваемые вынуждающими силами, часть которых зависит от технического состояния именно самого оборудования. Диагностическими параметрами низкочастотных составляющих вибрации чаще всего являются амплитуды колебаний на определенных частотах, пропорциональные величине соответствующих вынуждающих сил. В зависимости от размеров и сложности формы контролируемого оборудования низкочастотные колебания имеют частоты ниже 100–300 Гц.

Исторически так сложилось, что особый интерес у специалистов вызывают датчики вибрационных ускорений (ДВУ) (акселерометры) из класса электромагнитных преобразователей, использующих инерцию твердотельных элементов и предназначенных для измерения низкочастотных динамических процессов [18]. Следует отметить, что подобные механические системы с упругим подвесом инерционного элемента, отличающиеся простотой конструкции и обеспечивающие приемлемую точность, в настоящее время нашли самое широкое применение.

В качестве примера рассмотрим три варианта конструкции типичных электромагнитных параметрических датчиков, которые ориентированы на регистрацию виброускорения [19, 20]. В первом варианте (рис. 2, а) датчик относится к индукционному типу и представляет собой преобразователь с инерционным элементом в виде индукционной измерительной катушки 5, подвешенной на упругих мембранных подвесах 6, которые служат одновременно токоподводами. Магнитопровод датчика образован цилиндрическим корпусом 1, центральным сердечником 2 и крышками 3. Катушка возбуждения 4 содержит две секции, соединенные последовательно и встречно.

Во втором варианте датчик фактически является функциональным трансформаторным преобразователем с инерционным элементом в виде подвижного металлического короткозамкнутого витка (тонкостенный цилиндрический экран) (рис. 2, б).

Магнитная система такого датчика содержит ферромагнитные коаксиальные цилиндрические сердечники 2 и 5, корпус 11. Ферромагнитная перемычка 1 соединяет сердечник 5 и корпус 11. Сердечники 2 являются конструктивной частью крышек 6, которые име-

ют возможность перемещаться относительно корпуса 11. Секции катушки возбуждения 7 располагаются между сердечником 5 и корпусом 11 по обе стороны относительно перемычки 1. Измерительная катушка 8 размещена вдоль рабочего воздушного зазора, образованного сердечниками 2 и 5. Проводящий экран 9 укреплен на втулке 10 и с помощью немагнитного штока 4 жестко связан с плоскими упругими подвесами 3. Фланцы 12 обеспечивают герметизацию внутренней полости датчика.

Магнитная система обеих конструкций является регулируемой. Вращением крышек относительно корпуса достигается ее симметрирование, вследствие чего значительно снижается уровень квадратурной составляющей сигнала на выходе измерительной обмотки в «нулевом» положении подвижной части ДВУ. В качестве упругих подвесов в рассматриваемых конструкциях ДВУ применены плоские мембраны из бериллиевой бронзы или пружинной стали. Изменением жесткости упругих подвесов можно в значительных пределах изменять верхнюю границу диапазона измеряемых ускорений.

В третьем варианте датчик, представленный в виде параметрического соленоидного преобразователя с профилированным плунжером, относится к индуктивному типу, который широко используется в вибродиагностике. Упрощенная конструктивная компоновка этого датчика приведена на рис. 3, где 1 – конический симметричный якорь-плунжер, являющийся инерционным элементом; 2' и 2'' – кожухи-экраны, охватывающие якорь-плунжер 1; 3' и 3'' – измерительные катушки.

При среднем положении плунжера 1 относительно измерительных катушек 3' и 3'' величины зазоров между каждым экраном и плунжером одинаковы, а при смещении плунжера 1 вдоль его оси на величину x эти зазоры за счет конусности плунжера в одной катушке уменьшаются, а в другой при этом увеличиваются, что и вызывает в итоге появление на выходе измерительной мостовой схемы соответствующего напряжения $U(x)$. В рассматриваемом случае измерительные катушки включены в измерительную мостовую схему в качестве плечевых элементов в измерительную мостовую схему, на которую подается напряжение питания $U_{пит}$.

К недостаткам рассмотренных ДВУ следует отнести их невысокую чувствительность и низкую помехозащищенность, а также недостаточный уровень инвариантности к дестабилизирующим факторам. Кроме того, наличие у первого и второго вариантов ДВУ двухсекционных катушек возбуждения существенно усложняет как конструкцию самих ДВУ, так и технологичность их изготовления, что существенно снижает надежность их функционирования в целом. Следует отметить, что для третьего варианта ДВУ наличие системы магнитопроводов с изменяющимся зазором формирует сложную конфигурацию рабочих магнитных потоков для каждой из измерительных катушек, а создающие эти магнитные потоки рабочие токи катушек порождают паразитную взаимоиндукцию между ними, что в целом заметно усложняет процесс дальнейшего корректного преобразования информационных сигналов с ДВУ.

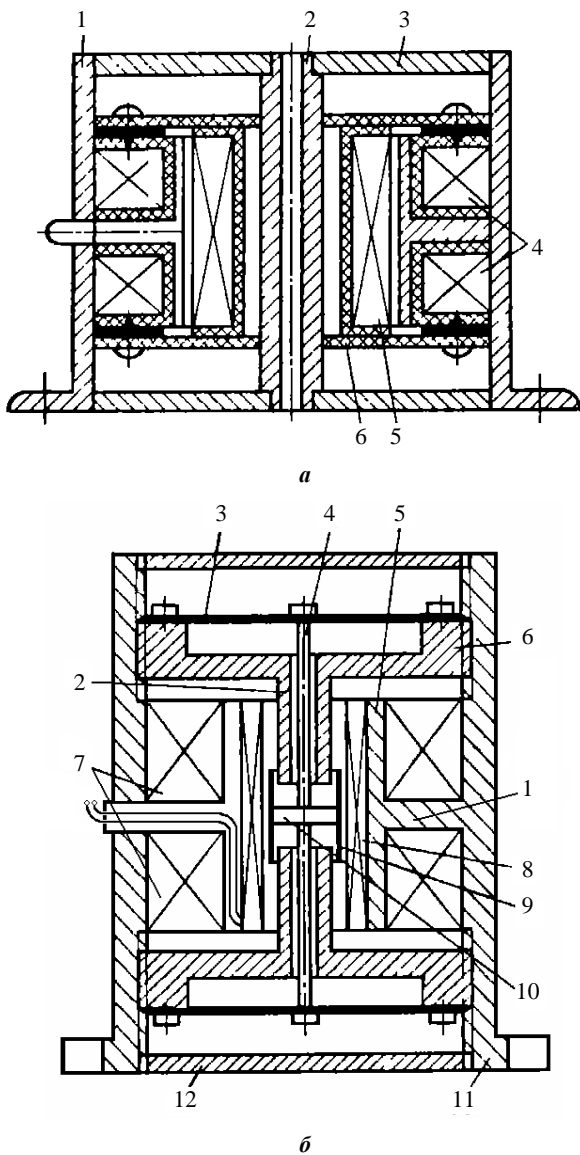


Рис. 2. Конструкция ДДУ:
а – с подвижной измерительной катушкой;
б – с подвижным короткозамкнутым витком

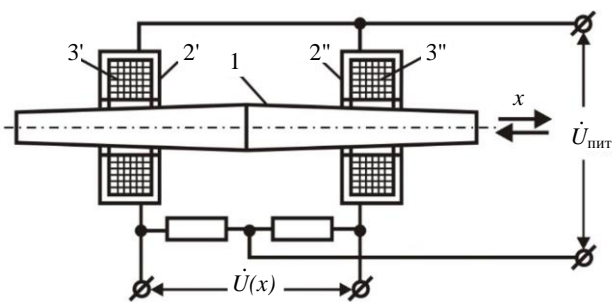


Рис. 3. Конструкция электромагнитного преобразователя индуктивного типа

ЭЛЕКТРОДНО-ИНДУКТИВНЫЙ ДАТЧИК ВИБРОУСКОРЕНИЯ

На основе проведенного всестороннего анализа рассмотренных ранее технических решений был предложен в качестве альтернативного варианта датчик виброускорения соленоидного типа, основанный на новом принципе действия. Конструкция этого датчика, отчасти напоминающая плунжерную соленоидную конструкцию, представлена на **рис. 4**.

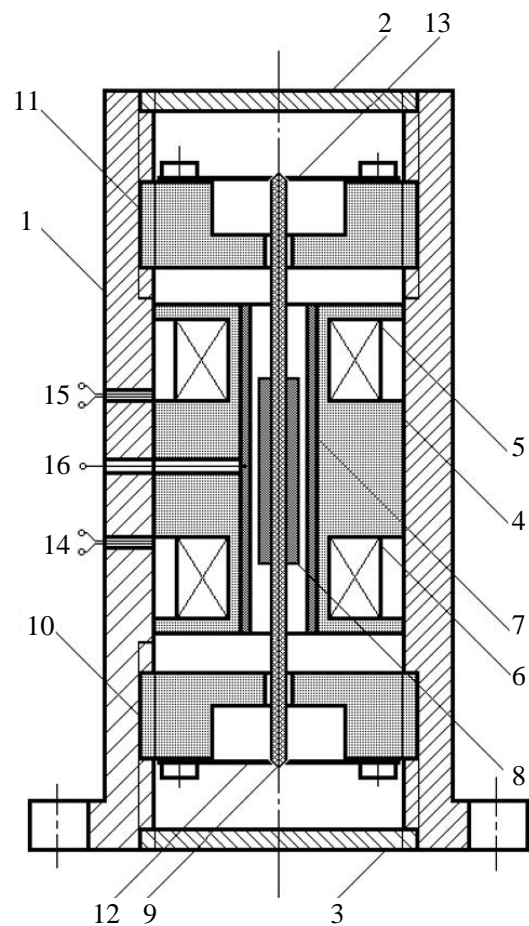


Рис. 4. Электродно-индуктивный датчик виброускорения

Все функциональные элементы датчика расположены внутри полости цилиндрического металлического корпуса 1 из немагнитного материала. Металлические фланцы 2 и 3, изготовленные также из немагнитного материала, обеспечивают герметизацию внутренней полости датчика. В свою очередь, измерительные катушки 5 и 6 размещены на диэлектрической фасонной цилиндрической втулке 4, на внутренней поверхности которой расположен медный электрод в виде тонкостенного цилиндра 7. Изготовленный из немагнитного материала шток 9, на котором находится немагнитная ферритовая цилиндрическая втулка 8, соответствующим образом сопряжен с плоскими упругими подвесами 12 и 13. Шток 9 и втулка 8 в своей совокупности образуют инерционную массу датчика. Коаксиальное расположение втулки 8 и цилиндрического электрода 6 обеспечивает необходимый гарантированный воздушный зазор между ними.

При этом плоские упругие подвесы 12 и 13 в совокупности с профильными диэлектрическими крышками 10 и 11, имеющими возможность линейного осевого перемещения относительно корпуса 1, образуют регулируемую систему подвеса инерционной массы датчика. Посредством профильных диэлектрических крышек 10 и 11 при настройке датчика обеспечивают начальное «нейтральное» пространственное положение этой инерционной массы. Сама конструкция датчика отчасти напоминает упомянутую ранее плунжерную соленоидную конструкцию. Клеммы 14 и 15

предназначены для подключения измерительных катушек 6 и 7 к соответствующим измерительным преобразователям информационных сигналов. Посредством клеммы 16 осуществляется подача напряжения питания на электрод 7.

Для более полного понимания принципа работы предлагаемого датчика рассмотрим подробно основные физические процессы, которые определяют новизну рассматриваемого технического решения.

Основные необходимые для проведения такого анализа конструктивные параметры датчика приведены на рис. 5, на котором приняты следующие обозначения: D_n и $D_{вн}$ – соответственно наружный и внутренний диаметры катушки; d – средний диаметр катушки; h – толщина сечения катушки; l_k – высота намотки катушки; $l_{сер}$ – длина сердечника (якоря); $l_{сер}/n$ – длина части сердечника, находящегося внутри катушки, n – долевая часть сердечника внутри катушки.

Принципиальная электрическая схема замещения и схема включения датчика представлены на рис. 6.

Здесь введены следующие условные обозначения: \dot{U}_0 – комплексная величина гармонического напряжения питания измерительных катушек; ФС – ферритовый сердечник (якорь-плунжер), являющийся инерционным элементом датчика и на который воздействует виброускорение g ; C_1 и C_2 – межвитковые емкости обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек; R_1 и R_2 – активные сопротивления обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек; L_1 и L_2 – индуктивности обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек; $C'_{св}$ и $C''_{св}$ – конденсаторы связи измерительных катушек с напряжением питания \dot{U}_0 соответственно для первой и второй измерительных катушек; ЭЦ₁ и ЭЦ₂ – соответственно первая и вторая параллельные электрические цепи мостовой схемы.

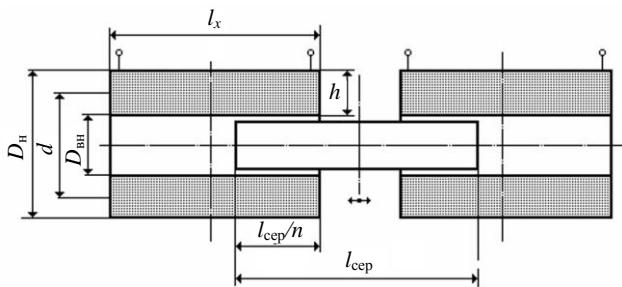


Рис. 5. Основные конструктивные параметры ДДУ

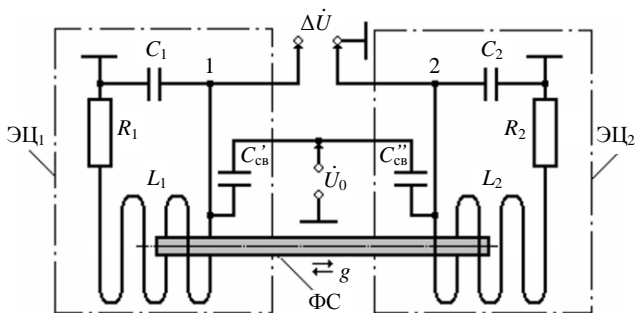


Рис. 6. Электрическая схема замещения и схема включения ДДУ

Следует отметить, что $C'_{св}$ и $C''_{св}$ конструктивно условно являются конденсаторами с паразитными емкостями, которые образованы медным цилиндрическим электродом с коаксиально внутри расположенным ФС и первыми нижними рядами проволочных обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек.

Из рис. 6 видно, что на обмотки измерительных катушек, фактически включенных в измерительную мостовую схему, через соответствующую диагональ этой мостовой схемы подается напряжение питания $u_0 = U_{0max} \sin \omega t$ (соответствующее комплексное значение – \dot{U}_0). Особенностью данного варианта ДДУ является факт того, что в качестве сигнального выхода каждой измерительной катушки относительно «корпуса» используется соответствующее «начало» ее электрической обмотки, что является одним из основных условий успешного функционирования ДДУ в целом. Если считать «начало» электрической обмотки каждой измерительной катушки входным концом их электрических обмоток, то можно сказать, что выходной сигнал ДДУ снимается через измерительную диагональ мостовой схемы в виде напряжения $\Delta \dot{U}$, возникающего между этими входными концами электрических обмоток 1 и 2 соответственно первой и второй измерительных катушек.

Тогда в соответствии с вышесказанным для комплексного сопротивления первой параллельной электрической цепи мостовой схемы ЭЦ₁ можем записать:

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_{1экр} + \dot{Z}_{13} = \frac{\dot{Z}_{11} \dot{Z}_{12}}{\dot{Z}_{11} + \dot{Z}_{12}} + \dot{Z}_{13}, \quad (1)$$

где $\dot{Z}_{1экр}$ – импеданс первой измерительной катушки; $\dot{Z}_{13} = -j \cdot 1/(\omega \cdot C'_{св})$ – комплексное сопротивление конденсатора связи с напряжением питания \dot{U}_0 первой измерительной катушки; $\dot{Z}_{11} = R_1 + j\omega L_1$ – комплексное сопротивление первой измерительной катушки (последовательно соединенные R_1 и L_1); $\dot{Z}_{12} = -j \cdot 1/(\omega \cdot C_1)$ – комплексное сопротивление межвитковой емкости первой измерительной катушки.

Определим импеданс первой измерительной катушки:

$$\dot{Z}_{1экр} = \frac{\dot{Z}_{11} \dot{Z}_{12}}{\dot{Z}_{11} + \dot{Z}_{12}} = -\frac{j(R_1 + j\omega L_1)}{\omega R_1 C_1 + j\omega^2 L_1 C_1 - j}. \quad (2)$$

Для резонансного возбуждения измерительных катушек, т.е. $\omega = \omega_p = 1/\sqrt{L_1 C_1}$, будем иметь

$$\dot{Z}_{1экр} = \frac{L_1}{R_1 C_1} - j \frac{1}{\omega_p C_1}. \quad (3)$$

С учетом выражений (1) и (3) можем для импеданса первой измерительной катушки записать

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= -\frac{L_1}{R_1 C_1} - j \frac{1}{\omega C_1} - j \frac{1}{\omega C'_{св}} = \\ &= \frac{L_1}{R_1 C_1} - j \frac{C'_{св} + C_1}{\omega_p C_1 C'_{св}} = \frac{\omega_p L_1 C'_{св} - j R_1 (C'_{св} + C_1)}{\omega_p C_1 C'_{св}}. \end{aligned} \quad (4)$$

В соответствии с (4) и на основании комплексной формы закона Ома для комплексного напряжения на первой измерительной катушке получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 - \dot{U}_{1cb} = \dot{U}_0 - \frac{\dot{U}_0}{Z_1} \dot{Z}_{13} = \\ &= \dot{U}_0 \left(1 + \frac{jC_1}{\omega_p L_1 C'_{cb} - jR_1 (C'_{cb} + C_1)} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

После соответствующих математических преобразований выражение (5) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 \left[1 - \frac{R_1 C_1 (C'_{cb} + C_1)}{\omega_p^2 L_1^2 C_{cb}^2 + R_1^2 (C'_{cb} + C_1)^2} + \right. \\ &\left. + j \frac{\omega_p L_1 C_1 C'_{cb}}{\omega_p^2 L_1^2 C_{cb}^2 + R_1^2 (C'_{cb} + C_1)^2} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Следует заметить, что все приведенные математические выражения для первой параллельной электрической цепи ЭЦ₁ мостовой схемы будут справедливы и для второй параллельной электрической цепи ЭЦ₂ мостовой схемы. Поэтому, аналогично (6), для комплексного напряжения на второй измерительной катушке можем записать

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_0 \left[1 - \frac{R_2 \cdot C_2 \cdot (C''_{cb} + C_2)}{\omega_p^2 \cdot L_2^2 \cdot C_{cb}^2 + R_2^2 \cdot (C''_{cb} + C_2)^2} + \right. \\ &\left. + j \cdot \frac{\omega_p \cdot L_2 \cdot C_2 \cdot C''_{cb}}{\omega_p^2 \cdot L_2^2 \cdot C_{cb}^2 + R_2^2 \cdot (C''_{cb} + C_2)^2} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Для корректного функционирования датчика будем считать, что

$$R_1 = R_2 = R; C_1 = C_2 = C; C'_{cb} = C''_{cb} = C_{cb}. \quad (8)$$

В соответствии с (6), (7) и (8) для комплексного значения выходного напряжения $\Delta \dot{U}$ с измерительной диагонали мостовой схемы получим:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U} &= \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \frac{-RC(C_{cb} + C)}{\omega_p^2 L_1^2 C_{cb}^2 + R^2 (C_{cb} + C)^2} + \\ &+ \frac{RC(C_{cb} + C)}{\omega_p^2 L_2^2 C_{cb}^2 + R^2 (C_{cb} + C)^2} + \\ &+ j \dot{U}_0 \left[\frac{\omega_p \cdot L_1 \cdot C \cdot C_{cb}}{[\omega_p^2 \cdot L_1^2 \cdot C_{cb}^2 + R^2 \cdot (C_{cb} + C)^2]} - \right. \\ &\left. - \frac{\omega_p \cdot L_2 \cdot C \cdot C_{cb}}{[\omega_p^2 \cdot L_2^2 \cdot C_{cb}^2 + R^2 \cdot (C_{cb} + C)^2]} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Введем коэффициент отношения $K = C/C_{cb}$ и величину $Q = \omega L/R$, которая отображает добротность измерительной катушки. С учетом сделанных замечаний и после несложных математических преобразований получим:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U} &= \\ &= \frac{\omega_p^2 C C_{cb}^2 (C_{cb} + C)}{R^3 \left[Q_1^2 C_{cb}^2 + (C_{cb} + C)^2 \right] \left[Q_2^2 C_{cb}^2 + (C_{cb} + C)^2 \right]} \times \\ &\times (L_1^2 - L_2^2) + j \dot{U}_0 \frac{\omega_p C C_{cb}^3 \left[Q_1 Q_2 - (C_{cb} + C)^2 / C_{cb}^2 \right]}{R^2 C_{cb}^4 \left[Q_1^2 + (C_{cb} + C)^2 / C_{cb}^2 \right]} \times \\ &\times \frac{1}{Q_2^2 + (C_{cb} + C)^2 / C_{cb}^2} (L_2 - L_1) = \\ &= \frac{\omega_p^2 C C_{cb}^2 (C_{cb} + C)}{R^3 \left[Q_1^2 C_{cb}^2 + (C_{cb} + C)^2 \right]} \times \\ &\times \frac{1}{Q_2^2 C_{cb}^2 + (C_{cb} + C)^2} (L_1^2 - L_2^2) + \\ &+ j \dot{U}_0 \frac{\omega_p K \left[Q_1 Q_2 - (1+K)^2 \right]}{R^2 \left[Q_1^2 + (1+K)^2 \right] \left[Q_2^2 + (1+K)^2 \right]} (L_2 - L_1). \end{aligned} \quad (10)$$

Выражение (10) можно также представить в более общем виде:

$$\Delta \dot{U} = \text{Re}(\Delta \dot{U}) + j \text{Im}(\Delta \dot{U}). \quad (11)$$

Из уравнения (10) следует, что информационный сигнал с выхода датчика имеет относительно сложную структуру, которая требует применения сложных алгоритмов его обработки. Для решения данной проблемы с учетом (11) предлагается использовать дополнительное преобразование информационного сигнала $U_{вх}(t)$ с вибродатчика в виде квадратурного детектирования посредством синхронного детектора (СД), являющегося линейным шестиполосником, проводимость которого $\sigma(t)$ при помощи опорного напряжения переменного тока $U_{оп}(t)$ периодически изменяется синхронно с частотой этого опорного напряжения $\omega_{оп}$ (рис. 7).

Иными словами, при подаче на измерительный вход СД измеряемого напряжения $U_{вх}(t)$ ток на его выходе будет определяться произведением измеряемого напряжения $U_{вх}(t)$ на проводимость $\sigma(t)$ СД, т.е.

$$i_{\text{ввых}}(t) = U_{\text{вх}}(t) \sigma(t),$$

где $\sigma(t) = \sigma_{\text{max}} \cdot \sin \omega_{оп} t$ – закон изменения проводимости СД во времени (вектор коммутации); σ_{max} – максимальное значение проводимости СД; $\omega_{оп}$ – циклическая частота опорного напряжения $U_{вх}$ СД.

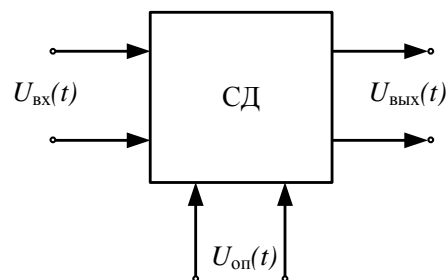


Рис. 7. Обобщенная схема СД в виде линейного шестиполосника

При подаче на измерительный вход СД с вектором коммутации $\sigma(t) = \sigma_{\max} \cdot \sin(\omega_{\text{оп}} t)$ гармонического сигнала $U_{\text{вх}}(t) = U_{\text{вх max}} \cdot \sin(\omega_{\text{оп}} t + \varphi)$ на его выходе имеем

$$i_{\text{вых}}(t) = \sigma_{\max} U_{\text{вх max}} \sin(\omega_{\text{оп}} t + \varphi) \cdot \sin \omega_{\text{оп}} t = \sigma_{\max} U_{\text{вх max}} \cos \varphi - \sigma_{\max} U_{\text{вх max}} \cos(2\omega t + \varphi). \quad (12)$$

В соответствии с (12) постоянная слагаемая выходного тока $I_{\text{Re,вых}}$ СД, определяемая активной составляющей входного измеряемого напряжения $U_{\text{вх}}(t)$, будет определяться выражением

$$I_{\text{Re,вых}} = \sigma_{\max} U_{\text{вх max}} \cos \varphi. \quad (13)$$

Тогда, аналогично (12) и (13), для постоянной составляющей выходного тока СД, определяемой реактивной составляющей входного измеряемого напряжения $U_{\text{вх}}(t)$, имеем

$$I_{\text{Im,вых}} = \sigma_{\max} U_{\text{вх max}} \sin \varphi. \quad (14)$$

Применительно к рассматриваемому случаю, в соответствии с (13) и (14), векторы опорных напряжений синхронного детектора совмещаются на комплексной плоскости с соответствующими составляющими вектора питающего напряжения мостовой цепи \dot{U}_0 , а на выходах синхронного детектора получают синфазную и квадратурную составляющие выходного напряжения с измерительной диагонали мостовой схемы, для которых можно соответственно записать:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{Re}} &= S_{\text{Re}} \Delta \dot{U} \cdot \cos(\arg \Delta \dot{U}); \\ \Delta U_{\text{Im}} &= S_{\text{Im}} \Delta \dot{U} \cdot \sin(\arg \Delta \dot{U}), \end{aligned} \quad (15)$$

где S_{Re} и S_{Im} – коэффициенты преобразования соответственно синфазного и квадратурного детекторов.

Упрощенный вариант блок-схемы выделения мнимой составляющей (квадратурной) информационного сигнала с вибродатчика представлена на **рис. 8**, где 1 – вибродатчик; 2 – источник переменного напряжения питания \dot{U}_0 вибродатчика; 3 – фазовращатель, обеспечивающий сдвиг опорного напряжения СД $\dot{U}_{\text{оп}}$ относительно напряжения питания \dot{U}_0 на фазовый угол $\pi/2$; 4 – синхронный детектор.

Исходя из вышесказанного, можно констатировать, что в процессе дальнейшей обработки информационного сигнала с датчика будет использоваться только его мнимая составляющая, которую согласно (10) и (11) можно представить в виде

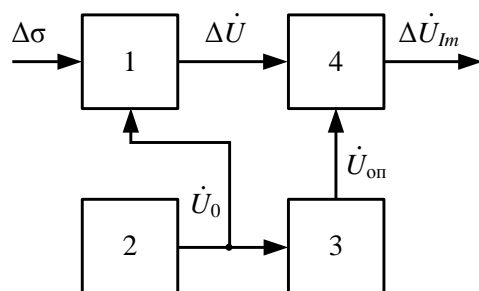


Рис. 8. Блок-схема выделения мнимой квадратурной составляющей

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{Im}} &= j \dot{U}_0 \frac{\omega_p K [Q_1 \cdot Q_2 - (1 + K)^2]}{R^2 [Q_1^2 + (1 + K)^2]} \times \\ &\times \frac{1}{[Q_2^2 + (1 + K)^2]} (L_2 - L_1). \end{aligned} \quad (16)$$

Далее рассмотрим вопросы, связанные с таким параметром измерительных катушек, как их индуктивность.

Индуктивность первой и второй катушек можно представить соответственно в следующей формализации:

$$L_1 = L_0 + L_{1\text{сеп}}; \quad L_2 = L_0 + L_{2\text{сеп}}, \quad (17)$$

где $L_0 = w^2 d(d/p)^{0.5} \cdot 10^{-8}$ – индуктивность катушки при отсутствии сердечника; w – число витков катушки; d – средний диаметр катушки; p – периметр площади сечения катушки; h – толщина сечения катушки; $L_{1\text{сеп}}$ и $L_{2\text{сеп}}$ – приращения индуктивности соответственно первой и второй катушек при перемещении сердечника.

В свою очередь, для приращения индуктивности соответственно первой и второй катушек при перемещении сердечника справедливы выражения следующего вида [18]:

$$\begin{aligned} L_{1\text{сеп}} &= L_{\text{max}} e^{-m(\delta_{1\text{сеп}})^2} = L_{\text{max}} e^{-m(\delta_0 + \delta)^2}; \\ L_{2\text{сеп}} &= L_{\text{max}} e^{-m(\delta_{2\text{сеп}})^2} = L_{\text{max}} e^{-m(\delta_0 - \delta)^2}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $L_{\text{max}} = w^2 \cdot (h/D_{\text{вн}}) \cdot a \cdot \lambda_{\text{вн}}^{-b} \cdot \zeta \cdot (\mu_{\text{сеп}}/4 \cdot \pi)$ – максимальное приращение индуктивности при полном введении сердечника в катушку; $\mu_{\text{сеп}}$ – магнитная проницаемость сердечника; a и b – величины, зависящие от $\lambda_{\text{н}}$ и определяемые по соответствующей номограмме [21]; ζ – поправочный коэффициент проводимости, определяемый экспериментальным путем; $\delta_{1\text{сеп}}$ – величина перемещения сердечника первой катушки индуктивности; $\delta_{2\text{сеп}}$ – величина перемещения сердечника второй катушки индуктивности; δ_0 – исходная величина части сердечника, находящейся в катушке, т.е. при его нейтральном расположении ($L_1=L_2$); δ – величина перемещения сердечника относительно его нейтрального расположения; m – коэффициент, зависящий от соотношений $\lambda_{\text{н}}=l_{\text{к}}/D_{\text{н}}$ и $\lambda_{\text{вн}}=l_{\text{к}}/D_{\text{вн}}$ и определяемый по соответствующей номограмме [21].

В случае моногармонической вибрации перемещения сердечника для каждой из катушек индуктивности относительно его нейтрального расположения можно представить в виде

$$\begin{aligned} \delta_{1\text{сеп}} &= \frac{l_{\text{сеп}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \sin(\Omega t + \varphi); \\ \delta_{2\text{сеп}} &= \frac{l_{\text{сеп}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \sin(\Omega t + \varphi), \end{aligned} \quad (19)$$

где $l_{\text{сер}}/n$ – длина части сердечника, находящегося внутри катушки; $l_{\text{сер}}$ – длина сердечника; n – долевая часть сердечника внутри катушки; $\delta_{\text{max}}/2$ – величина максимального перемещения сердечника относительно его нейтрального расположения; Ω – угловая частота перемещения сердечника.

С учетом (19) выражения (18) приводятся к виду

$$L_{1\text{сер}} = L_{\text{max}} \cdot e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сер}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2};$$

$$L_{2\text{сер}} = L_{\text{max}} \cdot e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сер}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2}.$$
(20)

Тогда для приращения индуктивности в результате периодического смещения сердечника ФС (см. рис. 5, 6) относительно его нейтрального расположения будем иметь

$$\Delta L_{\text{сер}} = L_2 - L_1 = L_{1\text{сер}} - L_{2\text{сер}} =$$

$$= L_{\text{max}} \left\{ e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сер}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} - e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сер}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} \right\} =$$

$$= w^2 \frac{h}{D_{\text{вн}}} a \lambda_{\text{вн}}^{-b} \zeta \frac{\mu_{\text{сер}}}{4 \cdot \pi} \times$$

$$\times \left\{ e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сер}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} - e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сер}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} \right\}.$$
(21)

Следует еще раз подчеркнуть, что нейтральное расположение сердечника ФС, имеющего упругий подвес и являющегося инерционным элементом датчика, состоящим из штока 9 и втулки 8, выставляется при подготовке датчика к работе при помощи профильных диэлектрических крышек 10 и 11, которые перемещают относительно корпуса 1 (см. рис. 4).

В соответствии с выражениями (13) и (18) можем записать

$$\Delta \dot{U}_{\text{Im}} = j S_{\text{Im}} \dot{U}_0 \times$$

$$\times \frac{\omega_p K \left[Q_1 Q_2 - (1 + K)^2 \right]}{R^2 \left[Q_1^2 + (1 + K)^2 \right] \cdot \left[Q_2^2 + (1 + K)^2 \right]} \Delta L_{\text{сер}} =$$

$$= j S_{\text{Im}} \dot{U}_0 \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \frac{\mu_{\text{сер}}}{4\pi} \times$$

$$\times \left\{ e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сер}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} - e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сер}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} \right\},$$
(22)

где $\Theta_3 = \frac{K \left[Q_1 Q_2 - (1 + K)^2 \right]}{R^2 \cdot \left[Q_1^2 + (1 + K)^2 \right] \cdot \left[Q_2^2 + (1 + K)^2 \right]}$ – коэффициент, отражающий взаимосвязи электрических

параметров катушек; $\Theta_{\kappa} = w^2 \cdot \frac{h}{D_{\text{вн}}} \cdot a \cdot \lambda_{\text{вн}}^{-b} \cdot \zeta$ – коэффициент, отражающий взаимосвязи конструктивных параметров катушек.

Исходя из того, что $e^z = 1 + \frac{z}{1!} + \frac{z^2}{2!} + \frac{z^3}{3!} + \dots$ и

пренебрегая степенными членами данного ряда, несложно трансформировать экспоненциальные члены выражения (22) к виду

$$e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сер}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} - e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сер}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} =$$

$$= 1 - m \left[\frac{l_{\text{сер}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2 -$$

$$- 1 + m \cdot \left[\frac{l_{\text{сер}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2 =$$

$$= \frac{l_{\text{сер}}}{n} \cdot \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi).$$
(23)

Принимая во внимание (23) и с учетом того, что $\dot{U}_0 = U_{0\text{max}} \cdot \cos \omega_p t + j \cdot U_{0\text{max}} \cdot \sin \omega_p t$, выражение (22) примет вид

$$\Delta \dot{U}_{\text{Im}} = j S_{\text{Im}} \dot{U}_0 \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \frac{\mu_{\text{сер}}}{4\pi} \cdot \frac{l_{\text{сер}}}{n} \cdot \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) =$$

$$= -S_{\text{Im}} U_{0\text{max}} \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \frac{\mu_{\text{сер}}}{4\pi} \cdot \frac{l_{\text{сер}}}{n} \cdot \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \sin(\Omega t + \varphi) \times$$

$$\times \sin \omega_p t + j S_{\text{Im}} U_{0\text{max}} \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \frac{\mu_{\text{сер}}}{4\pi} \cdot \frac{l_{\text{сер}}}{n} \cdot \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \times$$

$$\times \sin(\Omega t + \varphi) \cdot \cos \omega_p t.$$
(24)

Осуществим дополнительные преобразования тригонометрических функций в выражении (24):

$$\Delta \dot{U}_{\text{Im}} = S_{\text{Im}} U_{0\text{max}} \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \frac{\mu_{\text{сер}}}{4\pi} \cdot \frac{l_{\text{сер}}}{n} \cdot \frac{\delta_{\text{max}}}{4} \times$$

$$\times \left\{ \left[-\cos(\Omega t - \omega_p t + \varphi) + \cos(\Omega t + \omega_p t + \varphi) \right] + \right.$$

$$\left. + j \left[\sin(\Omega t - \omega_p t + \varphi) + \sin(\Omega t + \omega_p t + \varphi) \right] \right\} =$$

$$= S_{\text{Im}} U_{0\text{max}} \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \frac{\mu_{\text{сер}}}{4\pi} \cdot \frac{l_{\text{сер}}}{n} \cdot \frac{\delta_{\text{max}}}{4} \times$$

$$\times \left\{ -\left[\cos(\Omega t - \omega_p t + \varphi) - j \sin(\Omega t - \omega_p t + \varphi) \right] + \right.$$

$$\left. + \left[\cos(\Omega t + \omega_p t + \varphi) + j \sin(\Omega t + \omega_p t + \varphi) \right] \right\}.$$
(25)

Окончательный вариант выражения (25) можно представить в виде

$$\Delta \dot{U}_{\text{Im}} = \frac{1}{16\pi n} S_{\text{Im}} U_{0\text{max}} \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \times$$

$$\times \mu_{\text{сер}} l_{\text{сер}} \delta_{\text{max}} \left[e^{j[(\Omega + \omega_p)t + \varphi]} - e^{j[2\pi + (\omega_p - \Omega)t - \varphi]} \right].$$
(26)

Полученное аналитическое выражение (26) отражает четко выраженную функциональную зависимость приращения квадратурной составляющей информационного сигнала с вибродатчика от величины перемещения ФС измерительной катушки, вызываемой внешними вибрациями:

$$\Delta \dot{U}_{\text{lm}} = S_{\text{ик}} \Delta \delta, \quad (27)$$

где $\Delta \delta = \delta_{\text{max}} [e^{j[(\Omega + \omega_p)t + \varphi]} - e^{j[2\pi + (\omega_p - \Omega)t - \varphi]}]$ – относительное перемещение корпуса вибродатчика и его инерционного элемента; $S_{\text{ик}}$ – коэффициент преобразования всего измерительного канала,

$$S_{\text{ик}} = \frac{1}{16\pi n} S_{\text{lm}} U_{0\text{max}} \Theta_{\varphi} \Theta_{\kappa} \omega_p \mu_{\text{ср}} l_{\text{ср}}.$$

Перейдем от уравнений с приращениями (27) к уравнению с пределами:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \dot{U}_{\text{lm}}}{\Delta t} = S_{\text{ик}} U_{0\text{max}} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \delta}{\Delta t}. \quad (28)$$

Полученному уравнению (28) соответствует выражение вида

$$\frac{d\dot{U}_{\text{lm}}}{dt} = S_{\text{ик}} U_{0\text{max}} \frac{d\delta}{dt}$$

или $\dot{U}_v = S_{\text{ик}} U_{0\text{max}} \frac{d\delta}{dt}. \quad (29)$

Таким образом, полученное выражение (29) фактически отражает связь между измеренным напряжением на выходе измерительного канала и относительной скоростью перемещения корпуса вибродатчика и его инерционного элемента.

Аналогичным образом определим аналитическое выражение, отражающее связь между напряжением на выходе измерительного канала и относительным ускорением перемещения корпуса вибродатчика и его инерционного элемента:

$$\dot{U}_a = \dot{U}'_v = S_{\text{ик}} U_{0\text{max}} \frac{d^2\delta}{dt^2}. \quad (30)$$

Используя выражение (29), определим аналитическое выражение, отражающее связь между напряжением на выходе измерительного канала и относительным перемещением корпуса вибродатчика и его инерционного элемента:

$$\dot{U}_{\delta} = \int \dot{U}_v \cdot dt = S_{\text{ик}} U_{0\text{max}} \delta. \quad (31)$$

Известно, что для линейного вибродатчика дифференциальное уравнение, описывающее его работу имеет следующий вид [22]:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2\omega_0\beta \frac{d\delta}{dt} + \omega_0^2\delta = -g, \quad (32)$$

где g – ускорение перемещения корпуса вибродатчика в абсолютной системе координат; $\omega_0 = \sqrt{W/M}$ – собственная циклическая частота вибродатчика; W – жесткость упругих элементов; M – масса инерционного элемента; β – степень затухания.

В соответствии с (29) – (32) окончательно можем записать для значений измеряемого виброускорения выражение вида

$$\frac{1}{S_{\text{ик}}} \cdot \frac{\dot{U}_a}{U_{0\text{max}}} + \frac{2\omega_0\beta}{S_{\text{ик}}} \cdot \frac{\dot{U}_v}{U_{0\text{max}}} + \frac{\omega_0^2}{S_{\text{ик}}} \cdot \frac{\dot{U}_{\delta}}{U_{0\text{max}}} = -g$$

или

$$\frac{1}{S_{\text{ик}}} \cdot \frac{\dot{U}'_v}{U_{0\text{max}}} + \frac{2\omega_0\beta}{S_{\text{ик}}} \cdot \frac{\dot{U}_v}{U_{0\text{max}}} + \frac{\omega_0^2}{S_{\text{ик}}} \cdot \frac{1}{U_{0\text{max}}} \cdot \int \dot{U}_v \cdot dt = -g. \quad (33)$$

Анализ выражения (33) показал возможность нахождения значения регистрируемого виброускорения путем решения полученного дифференциального уравнения (33) с помощью аналоговых аппаратных средств. Три слагаемых левой части уравнения (33) формируются соответственно вибродатчиком (сигнал \dot{U}_v), дифференцирующим устройством (сигнал \dot{U}'_v) и интегрирующим устройством (сигнал \dot{U}_{δ}), включенными на выходе вибродатчика.

Вариант аппаратного решения нахождения регистрируемого виброускорения в виде упрощенной блок-схемы представлен на рис. 9, где 1 – вибродатчик; 2 – дифференцирующее устройство; 3 – интегрирующее устройство; 4 – суммирующее устройство; S_v , S_a , S_{δ} и S_{Σ} – весовые коэффициенты для выходных сигналов соответственно с вибродатчика, дифференцирующего, интегрирующего и суммирующего устройств.

При использовании цифровых преобразователей и наличии ПК с соответствующим аппаратно-программным интерфейсом возможно решение дифференциального уравнения (33) путем реализации специальных вычислительных алгоритмов.

Следует отметить, что резонансный режим функционирования электрических цепей ЭЦ₁ и ЭЦ₂ мостовой схемы вибродатчика обеспечивает максимальное значение напряжений на измерительных катушках при минимальных значениях их рабочих токов, что в конечном счете и обеспечивает высокую чувствительность предлагаемого варианта вибродатчика в целом.

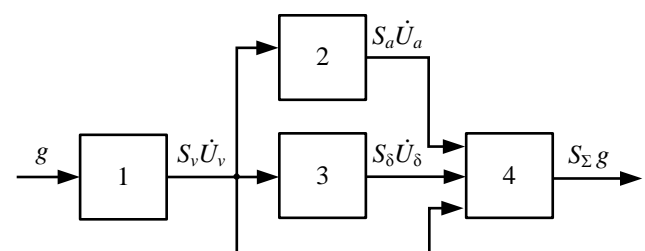


Рис. 9. Блок-схемы аппаратного решения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выделим основные особенности, присущие предлагаемому варианту вибродатчика:

1. Информативным параметром датчика, на который воздействуют внешние механические колебания, является величина глубины введения якоря-плунжера в полость его измерительной катушки.

2. Сама конструкция вибродатчика выполнена таким образом, что ее функциональные элементы образуют полноценный четырехплечий измерительный мост, в котором в качестве вспомогательных плечевых элементов мостовой схемы измерения вместо резистивных элементов используются емкостные элементы, являющиеся составной частью конструкции самого датчика, что в целом обеспечивает высокий уровень инвариантности к дестабилизирующим факторам.

3. Используется резонансный режим возбуждения измерительных катушек, что обеспечивает достаточно высокую чувствительность датчика в целом.

4. Технологичность конструктивного исполнения датчика и достаточная надежность подсистемы обработки информационного сигнала с датчика, поскольку отсутствует катушка возбуждения, а в качестве элемента возбуждения использован общий для конструктивных емкостных элементов связи $C'_{св}$ и $C''_{св}$ цилиндрический электрод, образующий, в свою очередь, совместно с измерительными катушками электродно-индуктивный вибродатчик с емкостной связью.

5. Отсутствие ферромагнитных контуров, намагниченных элементов конструкции, а также минимальные значения рабочих токов измерительных катушек и квадратурное преобразование информационного сигнала обеспечивает необходимый уровень помехозащищенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вибродиагностика / Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., Голуб Е.С., Веницкий М.Л., Неелов А.Н., Поросенков Ю.В., Таджибаев А.И. СПб.: ПЭИПК, 2003. 284 с.
2. Adams M.L. Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
3. Абрамов И.Л. Вибродиагностика энергетического оборудования. Кемерово: КузГТУ, 2011. 81 с.
4. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. СПб.: СПбГМТУ, 2004. 156 с.

5. Костюков В.Н., Науменко А.П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 125 с.
6. Manik D.N. Vibro-Acoustics: Fundamentals and Applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 487 p.
7. Girdhar P. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Elsevier, 2004. 255 p.
8. Петрухин В.В., Петрухин С.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации. Вологда: Инфра-Инженерия, 2010. 168 с.
9. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 360 с.
10. Современные методы и средства вибрационной диагностики машин и конструкций / Ф.Я. Балицкий, М.Д. Генкин, М.А. Иванова, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков // Научно-технический прогресс в машиностроении. М.: Междунар. центр науч. и техн. информ., ИМАШ им. А.А. Благодирова АН СССР, 1990. Вып. 25. 115 с.
11. Karimi H. Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems. Academic Press, 2020. 398 p.
12. Landau I.D., Airimioaie T.B. Adaptive and Robust Active Vibration Control: Methodology and Tests. New York: Springer, 2017. 405 p.
13. Балицкий Ф.Я., Барков А.В., Баркова Н.А. Неразрушающий контроль. Виброакустическая диагностика: справочник. М.: Машиностроение, 2005. 829 с.
14. Юркевич В.В., Схиртладзе А.Г. Надёжность и диагностика технологических систем. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 304 с.
15. Чичков Б.А. Вибродатчики и микроэлектромеханические системы мобильных устройств, как их аналоги, для оценки вибросостояния роторных машин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19, № 1. С. 120-125.
16. Опыт применения автоматизированных стационарных систем виброконтроля и вибродиагностики / Е.Н. Ишметьев, А.Н. Панов, А.В. Романенко, Е.Ю. Васильев, С.М. Коробейников // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 1(22). С. 56-59.
17. Беляев А.О. Интеллектуальный датчик виброскорости с аналоговым интегратором и цифровой коррекцией // Известия ЮФУ. 2008. № 2 (79). С. 130-135.
18. Федотов А.В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 176 с.
19. Конюхов Н.Е., Медников Ф.М., Нечаевский М.Л. Электромагнитные датчики механических величин. М.: Машиностроение, 1987. 256 с.
20. Цикерман Л.Я., Котляр Р.Ю. Индуктивные преобразователи для автоматизации контроля перемещений. М.: Машиностроение, 1966. 112 с.
21. Куликовский Л.Ф. Индуктивные измерители перемещений. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. 280 с.
22. Бибер Л.А., Жданова Ю.Е. Низкочастотные маятниковые виброметры. М.: Энергия, 1980. 64 с.

Поступила в редакцию 13 сентября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTRODE INDUCTIVE VIBRATION SENSOR WITH CAPACITANCE COUPLING

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Engineering), Professor, Senior Researcher, Head of the Information and Measuring System Laboratory, Institute of Mechanical Engineering and Automation, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic, bivas2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Power Faculty, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, elmech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Vadim R. Khramshin

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Industrial Electric Power Supply, Head of Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, hvrmgn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>

The analysis of vibroacoustic diagnostics systems was carried out. It was found that vibration acceleration sensors (accelerometers) from the class of electromagnetic transducers designed to measure low-frequency dynamic processes are of the greatest practical interest. A new version of a solenoid-type electrode inductive vibration acceleration sensor with an elastic suspension of an inertial element was proposed to measure low-frequency dynamic processes. A new vibration sensor design and its electrical equivalent circuit are presented as well as the operating principle of the vibration sensor. The sensor informative parameter, which is affected by external mechanical vibrations, is the insertion depth of the armature-plunger into the measuring coil cavity. To process the measurement information, a bridge circuit is used, and capacitive elements are used as auxiliary shoulder elements of this circuit, which are an integral design part of the sensor itself providing a high invariance level to destabilizing factors. In this case, the resonant excitation mode of the measuring coils is used, which ensures high sensitivity of the sensor as a whole. The analytical description of the main physical processes that determine the novelty of the considered technical solution was carried out. It is proposed to use an additional transformation of the information signal from the sensor in the form of quarter-phase detection by means of a synchronous detector.

Keywords: vibration sensor, measuring coil, inertial element, elastic suspension, turn-to-turn capacitance of the winding, coupling capacitors of measuring coils with supply voltage, bridge measuring circuit, resonance, quarter-phase detection.

REFERENCES

- Rosenberg G.Sh., Madorsky E.Z., Golub E.S., Vinickij M.L., Neelov A.N., Porosenkov Ju.V., Tadzhibaev A.I. *Vibrodiagnostika* [Vibration diagnostics]. Saint Petersburg, PEIPK Publ., 2003. 284 p. (In Russian)
- Adams M.L. *Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
- Abramov I.L. *Vibrodiagnostika jenergeticheskogo oborudovaniya* [Vibration diagnostics of power equipment]. Kemerovo, KuzGTU Publ., 2011. 81 p. (In Russian)
- Barkov A.V., Barkova N.A. *Vibracionnaja diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibracii* [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis]. Saint Petersburg, SPbGMTU Publ., 2004. 156 p. (In Russian)
- Kostyukov V.N., Naumenko A.P. *Prakticheskie osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki mashinnogo oborudovaniya* [Practical fundamentals of vibroacoustic diagnostics of machinery]. Omsk, Publishing house of OmSTU, 2002. 125 p. (In Russian)
- Manik D.N. *Vibro-Acoustics: Fundamentals and Applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 487 p.
- Girdhar P. *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Elsevier, 2004. 255 p.
- Petrukhin V.V., Petrukhin S.V. *Osnovy vibrodiagnostiki i sredstva izmereniya vibracii* [Basics of vibration diagnostics and vibration measuring instruments]. Vologda, Infra-Engineering Publ., 2010. 168 p. (In Russian)
- Kostyukov V.N., Naumenko A.P. *Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki i monitoringa mashin* [Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and machine monitoring]. Omsk: Publishing house of OmSTU, 2011. 360 p. (In Russian)
- Balitskiy F.Ya., Genkin M.D., Ivanova M.A., Sokolova A.G., Khomyakov E.I. *Modern methods and means of vibration diagnostics of machines and configurations. Nauchno-tekhnicheskij progress v mashinostroenii* [Scientific and technological progress in mechanical engineering]. Moscow, MCNiTI, A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering. Academy of Sciences of the USSR, 1990. 115 p. (In Russian)
- Karimi H. *Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems*. Academic Press, 2020. 398 p.
- Landau I.D., Airimioaie T.B. *Adaptive and Robust Active Vibration Control: Methodology and Tests*. New York, Springer, 2017. 405 p.
- Balitskiy F.Ya., Barkov A.V., Barkov N.A. *Nerazrushajushhij kontrol. Vibroakusticheskaja diagnostika* [Non-destructive testing. Vibroacoustic diagnostics]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2005. 829 p. (In Russian)
- Yurkevich V.V., Skhirtladze A.G. *Nadjozhnost i diagnostika tehnologicheskikh sistem* [Reliability and diagnostics of technological systems]. Moscow, Publishing Center "Academy", 2011. 304 p. (In Russian)
- Chichkov B.A. *Vibration sensors and microelectromechanical systems of mobile devices, as their analogues, for assessing the vibration state of rotary machines. Nauchnyj Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTU GA], 2016, vol. 19, no. 1, pp. 120-125. (In Russian)
- Ishmeteyev E.N., Panov A.N., Romanenko A.V., Vasiliev E.Yu., Korobeynikov S.M. *Experience of using automated stationary vibration control and vibration diagnostics systems. Elektrotehnicheskie sistemy i komplekisy* [Electrotechnical systems and complexes], 2014, no. 1(22), pp. 56-59. (In Russian)
- Belyaev A.O. *Intelligent vibration velocity sensor with an analog integrator and digital correction. Izvestiya JuFU* [Izvestia SFedU], 2008, no. 2 (79), pp. 130-135. (In Russian)
- Fedotov A.V. *Teoriya i raschet induktivnykh datchikov peremeshhenij dlja sistem avtomaticheskogo kontrolja* [Theory and calculation of inductive displacement sensors for automatic control systems]. Omsk, Publishing house of OmSTU, 2011. 176 p. (In Russian)
- Konyukhov N.E., Mednikov F.M., Nechaevsky M.L. *Elektromagnitnye datchiki mehanicheskikh velichin* [Electromagnetic sensors of mechanical quantities]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1987. 256 p. (In Russian)
- Tsikerman L.Ya., Kotlyar R.Yu. *Induktivnye preobrazovately dlja avtomatizacii kontrolja peremeshhenij* [Inductive transducers for automation of movement control]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1966. 112 p. (In Russian)

21. Kulikovskiy L.F. *Induktivnye izmeriteli peremeshhenij* [Inductive displacement meters]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1961. 280 p. (In Russian)

22. Bieber L.A., Zhdanova Yu.E. *Nizkочастотные маятниковые виброметры* [Low frequency pendulum vibrometers]. Moscow, Energy Publ., 1980. 64 p. (In Russian)

Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р. Электродно-индуктивный вибродатчик с емкостной связью // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 4(53). С. 39-49. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-39-49](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-39-49)

Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Electrode Inductive Vibration Sensor with Capacitance Coupling. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 39-49. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-39-49](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-39-49)

СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ С СИНУСОИДАЛЬНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ И ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Применение синусоидальной частотно-импульсной модуляции в автономных инверторах напряжения (АИН) вместо синусоидальной широтно-импульсной модуляции позволит уменьшить динамические потери в полупроводниковых ключах. Цель исследования представленной статьи заключается в разработке и математическом моделировании альтернативного вида модуляции (так называемой частотно-импульсной модуляции), которая позволяет уменьшить динамические потери в полупроводниковых ключах. Для анализа и сравнения энергетических зависимостей автономных инверторов напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ) в статье применены методы математического моделирования в среде *Matlab / Simulink*. В среде *Matlab / Simulink* разработана модель АИН с синусоидальной ЧИМ, которая задается аналого-цифровым способом. В ЧИМ длительность импульса остается постоянной, а периоды следования импульсов являются переменными и изменяются по синусоидальному закону. Полученные диаграммы автономного инвертора напряжения с ЧИМ показали, что частота модуляции по краям полупериодов выходного импульсного напряжения в два раза меньше, чем в середине полупериодов выходного импульсного напряжения. Вследствие этого динамические потери в модулях IGBT-транзисторов автономного инвертора напряжения с ЧИМ будут значительно ниже, чем в аналогичной схеме с ШИМ. Также приведены аналитические выражения, описывающие статические и динамические потери мощности в силовых полупроводниковых диодах и транзисторах. Методом полиномиальной аппроксимации силовых характеристик IGBT-транзисторов получены математические выражения, описывающие зависимости $U_{ce}(I_c)$, $U_F(I_F)$, $E_{on}(I_c)$, $E_{off}(I_c)$, $E_{rec}(I_c)$. На базе полученных выражений в среде *Matlab / Simulink* разработан блок расчета статических и динамических потерь мощности. Разработаны математические модели АИН с ЧИМ и ШИМ в среде *Matlab / Simulink* с использованием блоков из библиотеки *SimPowerSystem*. Применение ЧИМ вместо ШИМ позволяет увеличить коэффициент полезного действия АИН.

Ключевые слова: автономный инвертор напряжения, частотно-импульсная модуляция, широтно-импульсная модуляция, моделирование, динамические потери, аппроксимация, коэффициент полезного действия.

ВВЕДЕНИЕ

Преобразование постоянного напряжения в переменное может осуществляться с помощью инвертора, выполненного на транзисторных модулях IGBT [1]. Одним из наиболее простых преобразователей этого типа является трехфазный двухуровневый автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [2, 3], схема которого представлена на рис. 1.

Частотно-импульсная модуляция – это тип модуляции, где ширина импульса t_n остается постоянной и меняется только время паузы t_p . На рис. 2 показаны диаграммы формирования напряжения для управления полупроводниковыми ключами инвертора методом частотно-импульсной модуляции. Синусоидальный сигнал $U(t)$, прошедший частотно-импульсную модуляцию, будет представлен последовательностью импульсов одинаковой длительности t_n , ширина паузы t_p между которыми будет изменяться с изменением амплитуды $U(t)$ [4-7].

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В АИН

Потери мощности при коммутации IGBT-транзистора для заданных форм сигналов тока и напряжения разделены на три части, как показано на рис. 3. Суммарные потери энергии включают в себя статические и коммутационные потери в IGBT-транзисторе и в обратном диоде [8]. Статические потери IGBT-транзисторов и диодов происходят при включенном состоянии. Это потери P_{cond} их можно рассчитать как произведение тока коллектора и напряжения коллектора-эмиттера по формуле

$$P_{cond.inv} = \int_{t_2}^{t_3} (U_{ce}(I_c) I_c) \cdot dt, \tag{1}$$

где U_{ce} – напряжение коллектор-эмиттер; I_c – ток коллектора.

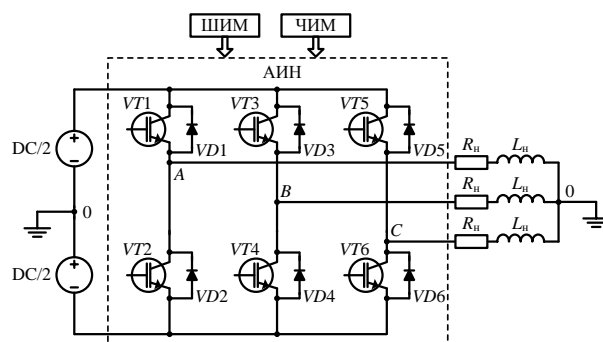


Рис. 1. Схема трехфазного АИН с ШИМ или ЧИМ модуляцией

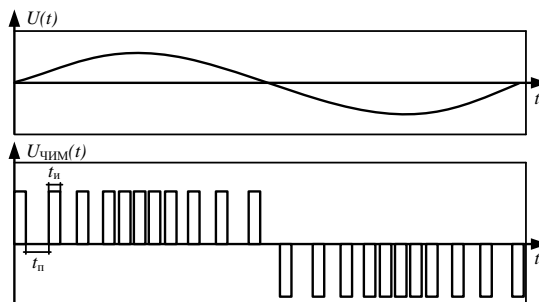


Рис. 2. Диаграммы формирования частотно-импульсной модуляции

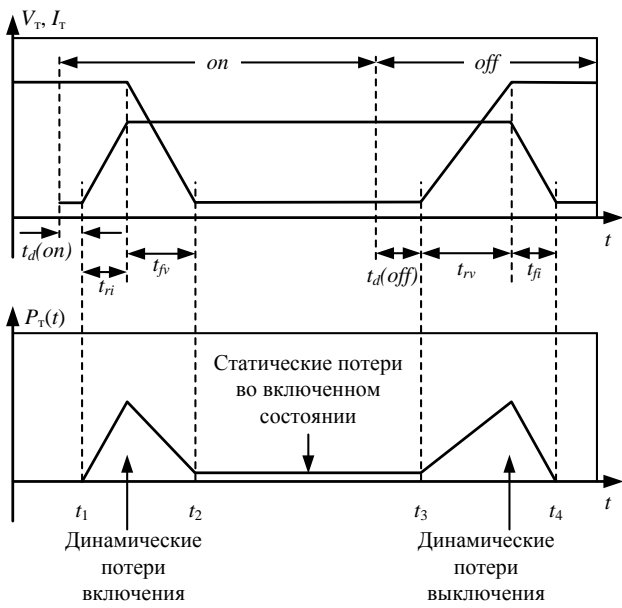


Рис. 3. Процесс коммутации IGBT-транзистора:

$t_1 - t_2$ - интервал включения; $t_2 - t_3$ - интервал включенного состояния; $t_3 - t_4$ - интервал выключения

Динамические потери в IGBT-транзисторах происходят при переходе из одного установившегося режима в другой (рис. 3), т.е. при переходе от выключенного состояния во включенное и наоборот [9-13]. Потери энергии при переключении устройства могут изменяться в зависимости от тока, напряжения, сопротивления затвора и температуры перехода [8].

Величина средней мощности коммутационных потерь определяется по следующим формулам:

$$P_{sw.inv} = [E_{on}(I_c) + E_{off}(I_c)]f, \quad (2)$$

$$P_{sw.inv} = \int_{t_1}^{t_2} [(I_c U_{ce})] dt + \int_{t_3}^{t_4} [(I_c U_{ce})] dt, \quad (3)$$

где $E_{on}(I_c)$ – энергия при включении, которая зависит от величины тока коллектора; $E_{off}(I_c)$ – энергия при выключении, которая тоже зависит от значения тока коллектора; f – частота коммутации.

Суммарные потери в АИН можно определить по выражению

$$P_{АИН} = P_{con.inv} + P_{SW.inv}, \quad (4)$$

где $P_{АИН}$ – потери мощности в ПЧ; $P_{con.inv}$ – статические потери мощности в транзисторе и обратном диоде; $P_{SW.inv}$ – коммутационные потери мощности в IGBT-транзисторе и обратном диоде.

В АИН значительный вклад в общие потери вносят коммутационные потери. Чтобы оценить КПД АИН и надежность его конструкции, необходимо точно рассчитать коммутационные потери.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АИН С ШИМ И ЧИМ

В среде Matlab с использованием блоков из библиотеки Simulink [14, 15] смоделирована схема АИН с ЧИМ, которая приведена на рис. 4. В работе [8] смоделированы и показаны потери в АИН с ШИМ.

Модель (см. рис. 4) содержит следующие блоки: блок автономного трехфазного мостового инвертора напряжения на шести IGBT/Diode-модулях (VT1/VD1 – VT6/VD6); блок системы управления ЧИМ; блок автоматического расчета потерь в инверторе (FS15R06XE1); блок нагрузки (R_n, L_n); комплект измерительных приборов.

Модель системы управления с синусоидальной ЧИМ показана на рис. 5.

Временные диаграммы системы управления показаны на рис. 6. В ЧИМ длительность импульса остается постоянной, а периоды следования импульсов являются переменными и меняются по синусоидальному закону.

На рис. 7 и 8 показаны диаграммы токов в АИН с ЧИМ и ШИМ.

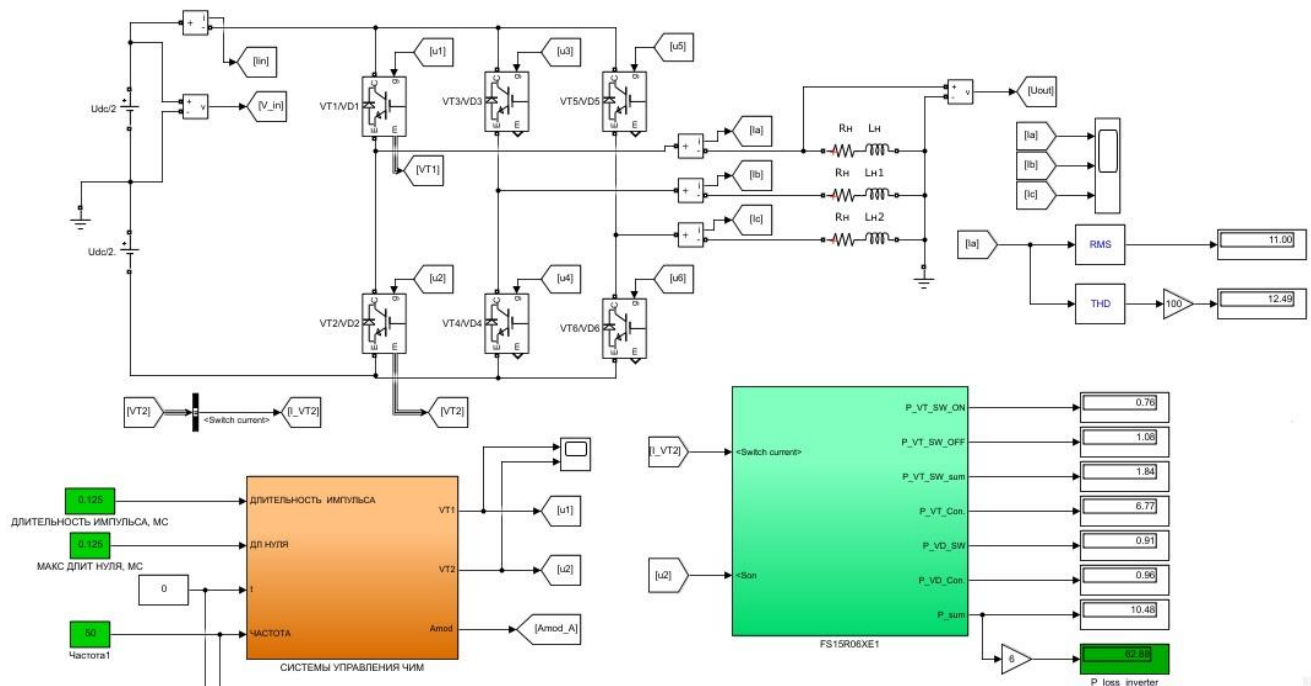


Рис. 4. Модель АИН с ЧИМ в среде MATLAB

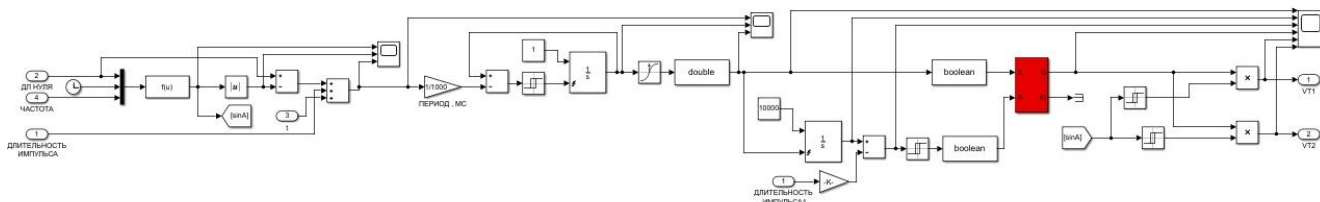


Рис. 5. Модель системы управления синусоидальной ЧИМ

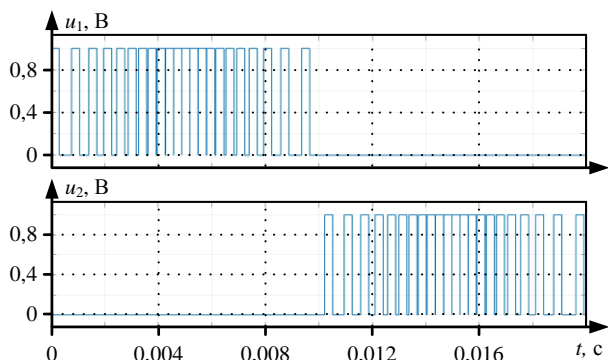


Рис. 6. Результаты моделирования: u_1, u_2 – напряжения управления транзисторами АИН в режиме ЧИМ

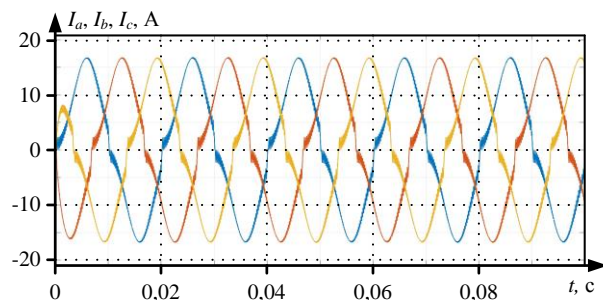


Рис. 7. Результат моделирования: выходные токи АИН с ЧИМ

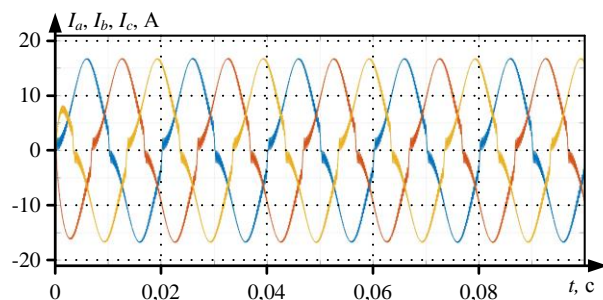


Рис. 8. Результат моделирования: выходные токи АИН с ЧИМ

БЛОК АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПОТЕРЬ В ИНВЕРТОРЕ

В настоящее время для расчета потерь в IGBT-транзисторах существуют различные способы, которые используют довольно сложные формулы с использованием многочисленных параметров. Следовательно, эти методы расчета нелегко реализовать на практике. В этой статье потери в АИН определены методом компьютерного моделирования, при котором использовались графики энергетических зависимостей полупроводниковых диодов и транзисторов.

Методом аппроксимации определены математические функции, наиболее точно описывающие графики энергетических зависимостей $U_{ce}(I_C)$, $U_F(I_F)$, $E_{on}(I_C)$,

$E_{off}(I_C)$, $E_{rec}(I_C)$ [9, 11, 12]. Энергетические графики зависимостей $U_{ce}(I_C)$, $E_{on}(I_C)$, $E_{off}(I_C)$ взяты из документации на полупроводниковые диоды и транзисторы и после аппроксимации показаны на рис. 9 и 10. Используя данный метод расчета, можно определить статические и динамические потери в IGBT-транзисторах и обратных диодах АИН, а также в целом количественно оценить КПД преобразователя.

После аппроксимации графиков потерь мощности IGBT-транзисторного модуля типа FS15R06XE3 получены следующие уравнения:

$$U_{CE}(I_C) = -102775 \left(\frac{I_C}{100} \right)^6 + 98467 \cdot \left(\frac{I_C}{100} \right)^5 - 36327 \cdot \left(\frac{I_C}{100} \right)^4 + 6505,8 \cdot \left(\frac{I_C}{100} \right)^3 - 590,76 \cdot \left(\frac{I_C}{100} \right)^2 + 32,772 \cdot \left(\frac{I_C}{100} \right) + 0,3152; \quad (5)$$

$$U_F(I_F) = -72672 \left(\frac{I_F}{100} \right)^6 + 71308 \left(\frac{I_F}{100} \right)^5 - 27122 \left(\frac{I_F}{100} \right)^4 + 5045,3 \left(\frac{I_F}{100} \right)^3 - 481,84 \left(\frac{I_F}{100} \right)^2 + 27,018 \left(\frac{I_F}{100} \right) + 0,4514; \quad (6)$$

$$E_{on}(I_C) = 4,8894 \left(\frac{I_C}{100} \right)^4 + 7,928 \left(\frac{I_C}{100} \right)^3 + 0,0715 \left(\frac{I_C}{100} \right)^2 + 1,8573 \left(\frac{I_C}{100} \right) + 0,0486; \quad (7)$$

$$E_{off}(I_C) = -15,198 \cdot \left(\frac{I_C}{100} \right)^4 + 16,984 \cdot \left(\frac{I_C}{100} \right)^3 - 8,0363 \cdot \left(\frac{I_C}{100} \right)^2 + 3,6428 \cdot \left(\frac{I_C}{100} \right) + 0,0456; \quad (8)$$

$$E_{rec}(I_F) = 5,4932 \cdot \left(\frac{I_F}{100} \right)^3 - 5,7025 \cdot \left(\frac{I_F}{100} \right)^2 + 2,6764 \cdot \left(\frac{I_F}{100} \right) + 0,0792. \quad (9)$$

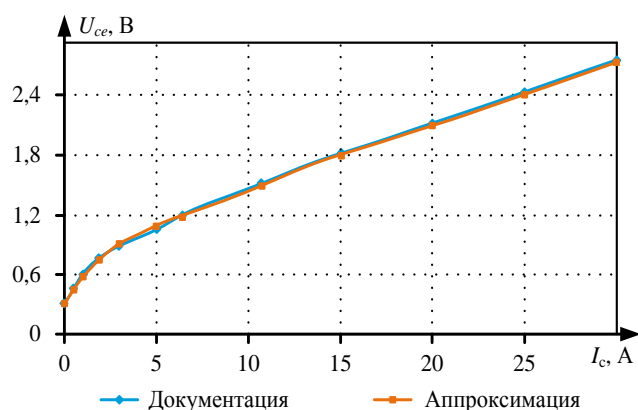


Рис. 9. Напряжение насыщения коллектор-эмиттер транзистора типа FS15R06XE3

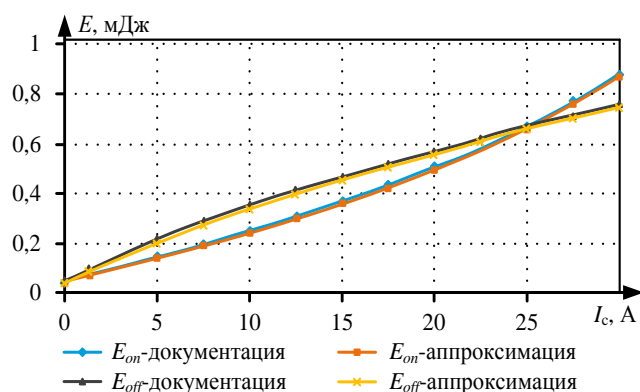


Рис. 10. Энергетические характеристики переключения силового транзистора типа FS15R06XE3

Полученные математические зависимости (5) – (9) достаточно точно описывают энергетические графики потерь мощности в IGBT/Diode модулей АИН.

Для расчета статических и динамических потерь мощности IGBT-транзистора используются напряжение и ток транзистора.

На рис. 11 показан блок расчета статических и динамических потерь мощности обратного диода IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3. На рис. 12 показан блок расчета статических и динамических потерь IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3.

Результаты моделирования статических и динамических потерь мощности IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3 показаны на рис. 13 и 14. Для моделирования динамических потерь используется метод моделирования с постоянным шагом расчета [8, 10, 11].

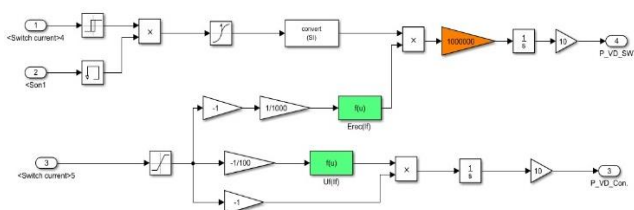


Рис. 11. Блок расчета потерь мощности обратного диода модуля типа FS15R06XE3

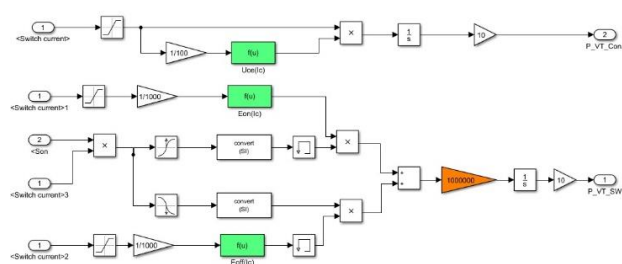


Рис. 12. Блок расчета потерь мощности транзистора модуля типа FS15R06XE3

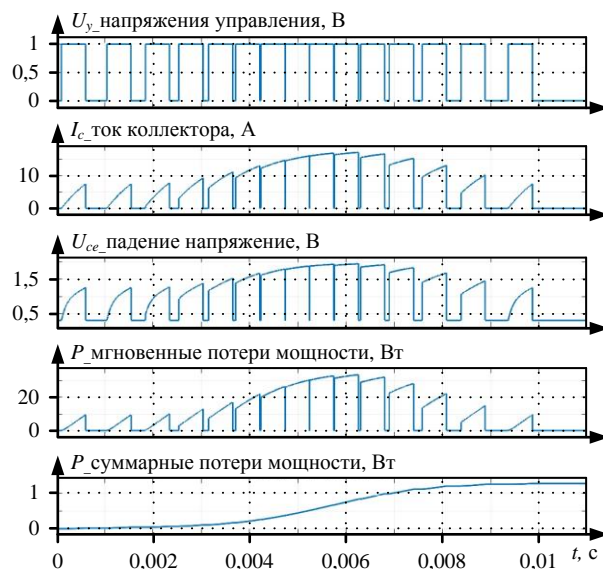


Рис. 13. Результаты моделирования статических потерь модуля типа FS15R06XE3 при ЧИМ

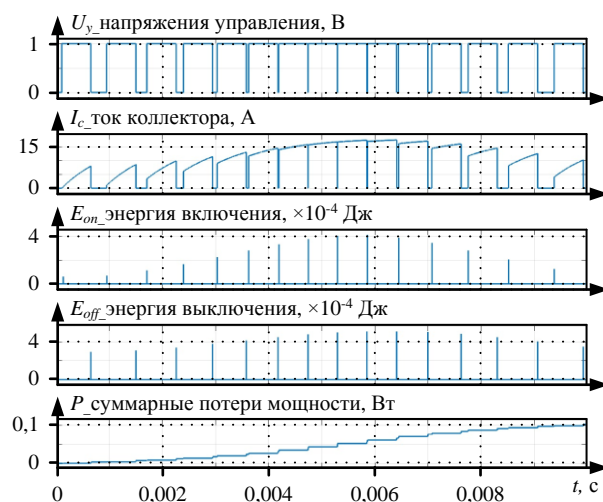


Рис. 14. Результаты моделирования динамических потерь модуля типа FS15R06XE3 при ЧИМ

СРАВНЕНИЕ ПОТЕРЬ В АИН С ШИМ И ЧИМ

Анализ потерь, полученных при моделировании схем АИН с ШИМ и ЧИМ при максимальной частоте $f_{\max} = 8$ кГц, приведен в таблице. Полученные диаграммы выходного импульсного напряжения АИН с ЧИМ показали, что частота модуляции по краям полупериодов выходного импульсного напряжения примерно в два раза меньше, чем в середине полупериодов выходного импульсного напряжения. Это приводит к снижению динамических потерь в транзисторах АИН с ЧИМ по сравнению с АИН с ШИМ на 21,4%, т.к. мощность динамических потерь прямо пропорциональна частоте модуляции.

Потери при моделировании схем АИН с ШИМ и ЧИМ

Параметры	ШИМ	ЧИМ
Число импульсов за период N	80	60
Действующий ток I_{RMS} , А	11	11
Мощность динамических потерь включения в транзисторе $P_{VT\ SW\ ON}$, Вт	0,95	0,76
Мощность динамических потерь выключения в транзисторе $P_{VT\ SW\ OFF}$, Вт	1,37	1,08
Мощность динамических потерь в транзисторе суммарная $P_{VT\ SW\ SUM}$, Вт	2,34	1,84
Мощность статических потерь в транзисторе $P_{VT\ con}$, Вт	6,76	6,77
Мощность динамических потерь в диоде $P_{VD\ SW}$, Вт	1,16	0,91
Мощность статических потерь в диоде $P_{VD\ con}$, Вт	1,1	0,96
Мощность потерь в транзисторе и диоде суммарная $P_{сум}$, Вт	11,35	10,48
Мощность потерь в транзисторах и диодах АИН суммарная $P_{инв}$, Вт	68,11	62,88
Коэффициент полезного действия АИН, %	95,66	95,98

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен метод математического моделирования АИН с ЧИМ и ШИМ. Разработана модель АИН с синусоидальной ЧИМ, которая задается аналого-цифровым способом. Приведенные диаграммы автономного инвертора напряжения с ЧИМ показывают, что частота модуляции по краям полупериодов выходного импульсного напряжения в два раза меньше, чем в середине полупериодов выходного импульсного напряжения. Вследствие этого динамические потери в IGBT-модулях автономного инвертора напряжения с ЧИМ будут значительно ниже, чем в аналогичной схеме с ШИМ. Для расчета потерь мощности IGBT-транзисторов методом полиномиальной аппроксимации определены математические уравнения, описывающие графики зависимостей $U_{ce}(I_c)$, $U_f(I_f)$, $E_{on}(I_c)$, $E_{off}(I_c)$, $E_{rec}(I_c)$. Полученные математические уравнения достаточно точно описывают графики потерь мощности. Применение ЧИМ позволяет уменьшить на 21 % динамические потери и увеличить коэффициент полезного действия АИН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование однофазного двухуровневого автономного инвертора напряжения с частотно-импульсной модуляцией // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2(18). С. 134-143. doi: 10.38028/ESI.2020.18.2.011
2. Dunaev M.P., Dovudov S.U., Arshinskiy L.V. // Energy characteristics the autonomous voltage inverter with the pulse-frequency modulation // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2020. Pp. 1-5. doi:

- 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271151
3. Дунаев М.П. Силовые электронные преобразователи электростанций: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 116 с.
4. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). СПб: ОАО «Электросила», 2003. 172 с.
5. Довудов С.У., Дунаев М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. № 24(2). С. 345-355. doi: 10.21285/1814-3520-2020-2-345-355
6. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы частотно-импульсного преобразователя // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. №3(15). С. 144-152. doi: 10.25729/2413-0133-2019-3-13
7. Ertan H.B., Simsir N.B. Comparison of PWM and PFM induction drives regarding audible noise and vibration for household applications // IEEE Transactions on Industry Applications. 2004. Vol. 40 (6). Pp. 1621-1628. doi: 10.1109/TIA.2004.836316
8. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование потерь мощности в преобразователе частоты // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 45-51. doi: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-45-51
9. Pulse width and pulse frequency modulation pattern controlled active clamp ZVS inverter link AC-DC power converter utility AC side active power filtering function for consumer magnetron driver / M. Nakaoka, B. Saha, S.P. Mun, T. Mishima, S.K. Kwon // IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2007. Pp. 1968-1971. doi: 10.1109/IECON.2007.4460148
10. Дунаев М.П., Довудов С.У. Сравнение энергетических показателей импульсных преобразователей постоянного тока по результатам имитационного компьютерного моделирования // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С. 35-41. doi: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-35-41
11. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics / O.A. Plakhtii, V.P. Nerubatskyi, D.A. Hordiienko, H.A. Khoruzhevskiy // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020. No. 2. Pp. 82-88. doi: 10.33271/nvngu/2020-82
12. Bouzida A., Abdelli R., Ouadah M. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive // 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). 2016. Pp. 768-773. doi: 10.1109/ICMIC.2016.7804216
13. Hanani W., Ayadi M. Comparison of IGBT switching losses modeling based on the datasheet and an experimental study // 2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA). 2019. Pp. 382-387. doi: 10.1109/STA.2019.8717219
14. Дьяконов В.П. MATLAB и Simulink для радиоинженера. М.: ДМК Пресс, 2011. 976 с.
15. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.

Поступила в редакцию 21 сентября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ENERGY EFFICIENCY COMPARISON OF AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER CIRCUITS WITH SINUSOIDAL PULSE-LATEST AND FREQUENCY-PULSE MODULATION

Mikhail P. Dunaev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, mdunaev10@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1523-5553>

Sarfarozi U. Dovudov

Postgraduate student, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, email: dsu_1991@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5600-4615>

The sinusoidal pulse-frequency modulation application in autonomous voltage inverters (AVI) instead of sinusoidal pulse-width modulation will reduce dynamic losses in semiconductor switches. The purpose of the study presented in the article is the development and mathematical modeling of an alternative type modulation (the so-called pulse-frequency modulation), which makes it possible to reduce dynamic losses in semiconductor switches. To analyze and compare the energy dependences of autonomous voltage inverters (AVI) with pulse width modulation (PWM) and pulse frequency modulation (PFM), the article uses mathematical modeling methods in the Matlab / Simulink environment. In the Matlab / Simulink environment, an AVI model with a sinusoidal PFM has been developed, which is set in an analog-digital way. In PFM, the pulse duration remains constant while the pulse repetition periods are variable and change sinusoidally. The obtained diagrams of an autonomous voltage inverter with PFM showed that the modulation frequency at the half-period edges of the output pulse voltage is 2 times lower than in the middle of the output pulse voltage half-periods. As a result, the dynamic losses in the IGBT modules of an autonomous voltage inverter with PFM will be significantly lower than in a similar circuit with PWM. Analytical expressions describing static and dynamic power losses in power semiconductor diodes and transistors are also given. By the method of polynomial approximation of the power characteristics of IGBT transistors, mathematical expressions are obtained that describe the dependences $U_{ce}(I_c)$, $U_F(I_F)$, $E_{on}(I_c)$, $E_{off}(I_c)$, $E_{rec}(I_c)$. On the basis of the obtained expressions in the Matlab / Simulink environment, a block for calculating static and dynamic power losses has been developed. The mathematical models of AVI with PFM and PWM have been developed in the Matlab / Simulink environment using blocks from the SimPowerSystem library. The PFM application instead of PWM makes it possible to increase the AVI efficiency.

Keywords: autonomous voltage inverter, pulse-frequency modulation, pulse-width modulation, simulation, dynamic losses, approximation, efficiency.

REFERENCES

- Dunayev M.P., Dovudov S.U. Simulation of a single-phase two-level autonomous voltage inverter with pulse frequency modulation. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 2(18), pp. 134-143. doi: 10.38028/ESI.2020.18.2.011 (In Russian)
- Dunaev M.P., Dovudov S.U., Arshinskiy L.V. Energy Characteristics the Autonomous Voltage Inverter with the Pulse-Frequency Modulation. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2020, pp. 1-5. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271151
- Dunayev M.P. *Silovyye elektronnyye preobrazovateli v elektrostantsiy* [Power electronic converters in power plants]. Irkutsk, IRNITU Publ., 2016. 116 p. (In Russian)
- Pronin M.V., Vorontsov A.G. *Silovyye polnostyu upravlyayemye poluprovodnikovyye preobrazovateli* [Power turn-off semiconductor converters]. Saint Petersburg, Elektrosi-
laPubl., 2003. 172 p. (In Russian)
- Dovudov S.U., Dunayev M.P. Analysis of energy indicators of pulse converters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2020, vol. 24, no 2, pp. 345-355. doi: 10.21285/1814-3520-2020-2-345-355. (In Russian)
- Dunayev M.P., Dovudov S.U. Simulation of the frequency-pulse converter circuit. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 3(15), pp. 144-152. doi: 10.25729/2413-0133-2019-3-13. (In Russian)
- Ertan H.B., Simsir N. B. Comparison of PWM and PFM induction drives regarding audible noise and vibration for household applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Nov.-Dec.2004, vol. 40, no. 6, pp. 1621-1628. doi: 10.1109/TIA.2004.836316
- Dunaev M.P., Dovudov S.U. Simulation of Power Losses in a Frequency Inverter. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 45-51. doi: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-45-51. (In Russian)
- Nakaoka M., Saha B., Mun S.P., Mishima T., Kwon S.K. Pulse Width and Pulse Frequency Modulation Pattern Controlled Active Clamp ZVS Inverter Link AC-DC Power Converter Utility AC Side Active Power Filtering Function for Consumer Magneton Driver. *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2007, pp. 1968-1971. doi: 10.1109/IECON.2007.4460148
- Dunaev M.P., Dovudov S.U. Comparing the Energy Performance of Pulsed DC Converters According to the Results of Computer Simulation. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 35-41. doi: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-35-41 (In Russian)
- Plakhtii O.A., Nerubatskiy V.P., Hordienko D.A., Khoruzhevskiy H.A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020, no. 2, pp. 82-88. doi: 10.33271/nvngu/2020-82
- Bouzida A., Abdelli R., Ouadah M. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). 2016, pp. 768-773. doi: 10.1109/ICMIC.2016.7804216.
- Hanini W., Ayadi M. Comparison of IGBT switching losses modeling based on the datasheet and an experimental study. 2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA). 2019, pp. 382-387. doi: 10.1109/STA.2019.8717219
- Dyakonov V.P. *MATLAB i Simulink dlya radioinzhenera* [MATLAB and Simulink for a radio engineer]. Moscow, DMK Press Publ., 2011. 976 p. (In Russian)
- Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2008. 288 p. (In Russian)

Дунаев М.П., Довудов С.У. Сравнение энергоэффективности схем автономных инверторов напряжения с синусоидальной широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляцией // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 4(53). С. 50-55. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-50-55](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-50-55)

Dunaev M.P., Dovudov S.U. Energy Efficiency Comparison of Autonomous Voltage Inverter Circuits with Sinusoidal Pulse-Latest and Frequency-Pulse Modulation. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 50-55. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-50-55](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-50-55)

Валиуллин К.Р.

Оренбургский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЦЕПЯХ СО СВЕТОДИОДНЫМИ СВЕТИЛЬНИКАМИ

В работе рассматривается возможность возникновения резонансных явлений в осветительных сетях с мощными светодиодными светильниками и сторонними индуктивными нагрузками. Произведен анализ работы светодиодных светильников на промышленном предприятии, показавший, что наличие в осветительной сети сторонних активно-индуктивных нагрузок приводит к ускоренному выходу из строя осветительных приборов даже при условии соответствия стандартам качества электрической энергии. Для исследования процессов, происходящих во время коммутации, предложен алгоритм расчета режима работы осветительной сети, позволяющий рассчитать режим её работы до и после включения сторонних нагрузок. Для светодиодного светильника были сняты осциллограммы тока и напряжения, получено выражение, аппроксимирующее вольт-амперные характеристики (ВАХ) светодиодного светильника. С учетом ВАХ проанализированы изменения кривой тока светильников до и после подключения сторонней индуктивной нагрузки: наличие разрыва в значении тока в момент коммутации показало, что переходный процесс может носить резонансный характер и приводить к ускоренному выходу светильников из строя.

Ключевые слова: светодиодные светильники, резонанс, качество электрической энергии.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на крупных промышленных предприятиях наблюдается постепенная замена источников света на светодиодные. В связи с запретом на использование ламп типа ДРЛ и их низкой энергоэффективностью в ближайшем будущем переход на светодиодные источники света будет только интенсифицироваться. С точки зрения электротехнических характеристик светодиодные источники света существенно отличаются от люминесцентных не только пониженным энергопотреблением, но и характером нагрузки. Из-за наличия в пускорегулирующих аппаратах дросселя с большой индуктивностью лампы типа ДРЛ и ДНаГ представляют собой активно-индуктивную нагрузку. Светодиодные светильники, напротив, являются активно-емкостной нагрузкой. Большинство электроприемников промышленных предприятий являются активно-индуктивными и появление в электрической сети нагрузок, имеющих емкостной характер, может приводить к резонансным явлениям.

Как показал анализ научно-технической литературы в области эксплуатации светодиодных светильников и их влияния на системы электроснабжения, большое внимание уделяется вопросам влияния светодиодных светильников на качество электрической энергии [1-4]. Авторы отмечают, что применение светодиодных светильников влияет на гармонический состав тока и напряжения, что может негативно влиять на качество электроэнергии. В работах [4-6] также обосновывается необходимость учета несинусоидальности тока светодиодных светильников при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий. Возможность возникновения резонансных явлений в цепях со светодиодными светильниками отмечена в статье [7], при этом указано, что резонанс токов может быть причиной выхода из строя источников питания светодиодных светильников. Аналогичные выводы приведены в работе [8], посвященной анализу резонансных явлений в системах электроснабжения

промышленных предприятий. Подробный анализ возможностей резонансных явлений в цепях питания светодиодных источников света приводится в работе [9], но при этом стоит отметить, что данная работа была опубликована более 10 лет назад и не в полной мере учитывает современные подходы к построению источников питания светодиодных источников света. Таким образом, на фоне распространения светодиодных систем освещения исследование возможностей возникновения резонансных явлений в сетях со светодиодными светильниками является актуальной задачей.

АНАЛИЗ РЕЖИМА РАБОТЫ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

На одном из крупных предприятий Оренбургской области была произведена модернизация системы освещения и установлены светодиодные светильники мощностью 170 Вт, $\cos\phi=0,98$ (емкостной). За полтора года эксплуатации вышла из строя треть установленных светильников, причем некоторые светильники выходили из строя и после замены. Аналогичная ситуация имела место и в смежных цехах. Для выяснения причин выхода светильников из строя на питающую линию был установлен анализатор качества электрической энергии и в течение пяти дней произведен мониторинг основных параметров качества электрической энергии. Измерения производились с помощью анализатора качества электрической энергии Metrel MI 2792 Power Q4 Plus. Однолинейная схема исследуемого участка и место установки прибора показаны на **рис. 1**.

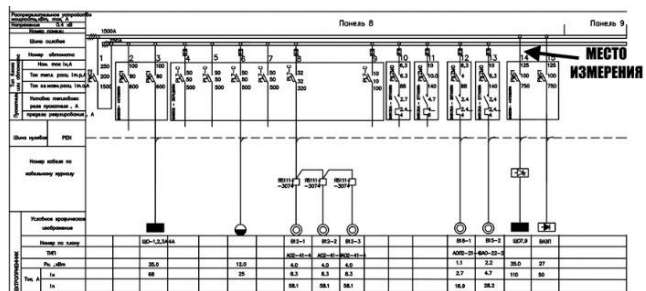


Рис. 1. Место установки анализатора качества электрической энергии

В результате обработки собранных данных было установлено, что за период наблюдений несоответствия нормам, установленным в ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», выявлено не было. Значения гармонических составляющих напряжения и составляющих обратной и нулевой последовательности находились в установленных стандартом рамках. В ходе более детального анализа происходящих процессов были проанализированы графики изменения тока по фазам, представленные на рис. 2.

Как видно из рис. 2, в фазах А и В нагрузка равномерная, без резких изменений. В фазе С наблюдаются резкие скачки потребляемого тока в течение всего периода наблюдений. На рис. 3 представлено изменение потребляемой активной и реактивной мощности в фазе С за тот же период.

Из анализа рис. 3 можно сделать вывод, что в фазе С наблюдаются частые кратковременные включения нагрузки, носящей чисто активный характер с мощностью от 0,7 до 1,5 кВт, а также зафиксированы включения нагрузки, носящей индуктивный характер с мощностью 0,5-1 кВАр. В силу особенностей измерительного прибора значения мощности представляют собой мощности, усредненные на интервале измерения в 10 минут. На графике также наблюдается определенная периодичность включения нагрузок. Для активной нагрузки периоды между включениями составляют около 3 часов, при этом включение в ночное время практически отсутствует. Индуктивная нагрузка в большинстве случаев включается в период времени с 12 до 14 часов, а также с 17 до 19 часов. Исходя из периодичности и времени включения сторонних нагрузок, наиболее вероятно, что активной нагрузкой является электронагревательный прибор, вероятно электрочайник, а индуктивной нагрузкой – микроволновая печь.

При этом необходимо отметить, что возникновение подобных процессов у бытовых потребителей крайне маловероятно, так как мощность используемых в быту светодиодных ламп существенно меньше, чем у промышленных светильников, и несопоставима с мощностью подключаемых индуктивных нагрузок. Таким образом, можно сделать предположение о том, что резонансные явления в осветительных сетях возникают в том случае, когда промышленные светильники большой мощности включаются совместно с бытовой нагрузкой. Редкое сочетание подобных факторов объясняет то, что данное явление не было подробно изучено в научной литературе.

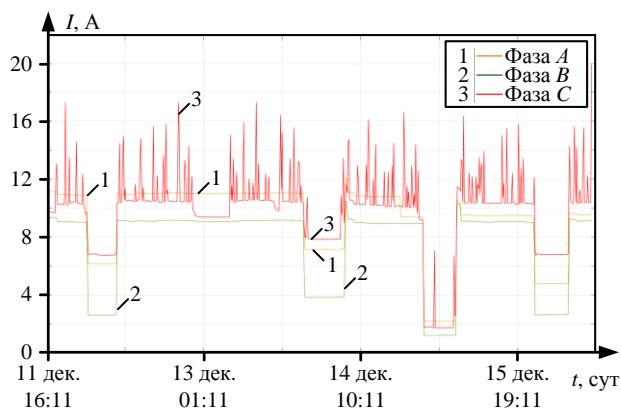


Рис. 2. График изменения тока по фазам

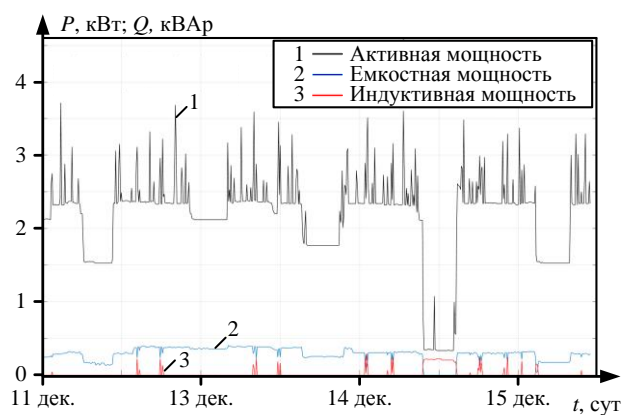


Рис. 3. График изменения потребляемой активной и реактивной мощности в фазе С

РАСЧЁТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ

Для исследования процессов, происходящих при коммутации активно-индуктивной нагрузки в сети со светодиодными светильниками был произведён расчет режима работы сети до и после включения сторонней нагрузки. Для расчета была составлена схема замещения, представленная на рис. 4.

Для расчета режимов работы были приняты следующие параметры:

- сопротивление светильника $Z_{св}=301,8-53,3j$ Ом (получено исходя из номинального напряжения светильника в 230 В и мощности 170-30j ВА);
- сопротивление подключаемой к светильникам нагрузки $Z_{н}=52,6+12,7j$ (соответствует мощности 0,95+0,23j кВА);
- сопротивление каждого из участков кабельной линии $Z_{к}=0,148+0,0023j$;
- число светильников $n=13$;
- напряжение питающей сети $U_0=230$ В.

В среде Matlab была написана программа, позволяющая рассчитать режим работы цепи до и после коммутации при различных параметрах. Результатами расчета являются значения напряжений на каждом светильнике, токов, проходящих через каждый светильник и отрезок кабельной линии. Расчёт режима производится в следующем порядке:

1. Путем последовательных преобразований схемы замещения рассчитывается входное сопротивление осветительной линии $Z_{вх}$.

2. Для известного напряжения в начале осветительной линии по закону Ома рассчитывается ток на головном участке осветительной сети:

$$I_1 = \frac{U_0}{Z_{вх}}, \tag{1}$$

где U_0 – напряжение в месте подключения осветительной линии, В; $Z_{вх}$ – входное сопротивление осветительной сети, Ом.

3. Рассчитывается падение напряжения на головном участке кабельной линии:

$$\Delta U = I_1 Z_{к1}, \tag{2}$$

где $Z_{к1}$ – сопротивление отрезка кабельной линии, Ом.

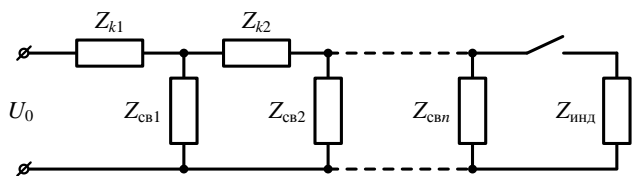


Рис. 4. Схема замещения

4. Рассчитывается напряжение на первом светильнике:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_0 - \Delta \dot{U}. \quad (3)$$

5. Исходя из допущения о линейности ВАХ светодиодного светильника в интересующем диапазоне напряжений [10, 11], определяется ток, потребляемый первым светильником:

$$i_{св1} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{св}}, \quad (4)$$

где $Z_{св}$ – сопротивление светильника, Ом.

6. Согласно первому закону Кирхгофа рассчитывается ток на втором участке питающей кабельной линии:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 - \dot{i}_{св1}. \quad (5)$$

7. Затем пункты 3-6 повторяются для оставшихся участков сети. Аналогичным образом рассчитывается режим работы осветительной сети после подключения индуктивной нагрузки.

Результаты расчета напряжений на светильниках представлены в таблице. Как видно из таблицы, при включении индуктивной нагрузки режим работы светильников изменился незначительно. Наибольшее влияние включение индуктивной нагрузки оказывает на напряжение у наиболее удаленных светильников. При этом необходимо отметить, что мнимая часть комплекса напряжения на светильниках близка к смене своего знака.

Результаты расчёта режимов работы светильников

n	До включения индуктивности		После включения индуктивности	
	$\dot{U}_n, В$	$\dot{I}_{свn}, А$	$\dot{U}_n, В$	$\dot{I}_{свn}, А$
1	$228,52 \cdot e^{-0,07j}$	$0,74 \cdot e^{10,1j}$	$227,99 \cdot e^{-0,04j}$	$0,74 \cdot e^{10,1j}$
2	$227,15 \cdot e^{-0,13j}$	$0,74 \cdot e^{10,1j}$	$226,08 \cdot e^{-0,07j}$	$0,74 \cdot e^{10,1j}$
3	$225,89 \cdot e^{-0,19j}$	$0,74 \cdot e^{12,36j}$	$224,28 \cdot e^{-0,1j}$	$0,73 \cdot e^{10,2j}$
4	$224,73 \cdot e^{-0,25j}$	$0,74 \cdot e^{9,33j}$	$222,59 \cdot e^{-0,12j}$	$0,73 \cdot e^{9,5j}$
5	$223,69 \cdot e^{-0,3j}$	$0,73 \cdot e^{9,46j}$	$220,99 \cdot e^{-0,14j}$	$0,72 \cdot e^{9,6j}$
6	$222,74 \cdot e^{-0,35j}$	$0,73 \cdot e^{10,2j}$	$219,52 \cdot e^{-0,15j}$	$0,72 \cdot e^{9,6j}$
7	$221,92 \cdot e^{-0,39j}$	$0,72 \cdot e^{10,4j}$	$218,14 \cdot e^{-0,16j}$	$0,71 \cdot e^{9,7j}$
8	$221,19 \cdot e^{-0,42j}$	$0,72 \cdot e^{9,59j}$	$216,86 \cdot e^{-0,16j}$	$0,71 \cdot e^{9,7j}$
9	$220,56 \cdot e^{-0,45j}$	$0,72 \cdot e^{9,59j}$	$215,69 \cdot e^{-0,16j}$	$0,7 \cdot e^{9,86j}$
10	$220,04 \cdot e^{-0,48j}$	$0,72 \cdot e^{9,59j}$	$214,62 \cdot e^{-0,15j}$	$0,7 \cdot e^{9,86j}$
11	$219,62 \cdot e^{-0,5j}$	$0,72 \cdot e^{9,59j}$	$213,66 \cdot e^{-0,14j}$	$0,7 \cdot e^{9,86j}$
12	$219,3 \cdot e^{-0,52j}$	$0,72 \cdot e^{9,59j}$	$212,79 \cdot e^{-0,12j}$	$0,69 \cdot e^{10j}$
13	$219,1 \cdot e^{-0,53j}$	$0,72 \cdot e^{9,59j}$	$212,02 \cdot e^{-0,1j}$	$0,69 \cdot e^{10j}$

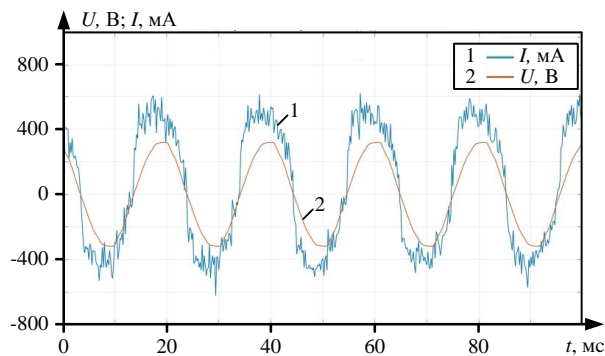


Рис. 5. Осциллограмма тока и напряжения на светодиодном светильнике

Для более детального анализа изменения мгновенных значений тока с Metrel MI 2792 Power Q4 Plus, работающего в режиме осциллографирования, были сняты осциллограммы тока и напряжения для светодиодного светильника. Полученные осциллограммы представлены на рис. 5.

Как видно из осциллограммы, светодиодный светильник представляет собой практически линейную нагрузку, но при этом форма кривой тока искажается шумами, которые можно частично объяснить электромагнитными наводками и паразитной емкостью проводов, с помощью которых подключен прибор. По полученным данным была произведена интерполяция вольт-амперной характеристики светодиодного светильника полиномом третьей степени. С высокой степенью точности ВАХ может быть описана уравнением

$$i(u) = -9,44 \cdot 10^{-6} u^3 - 1,99 \cdot 10^{-4} u^2 + 2,31 u, \quad (6)$$

где I – ток, mA; u – напряжение, В.

С учётом полученной ВАХ светильника были построены кривые изменения мгновенных значений тока и напряжения при переходном процессе включения/отключения индуктивной нагрузки (рис. 6).

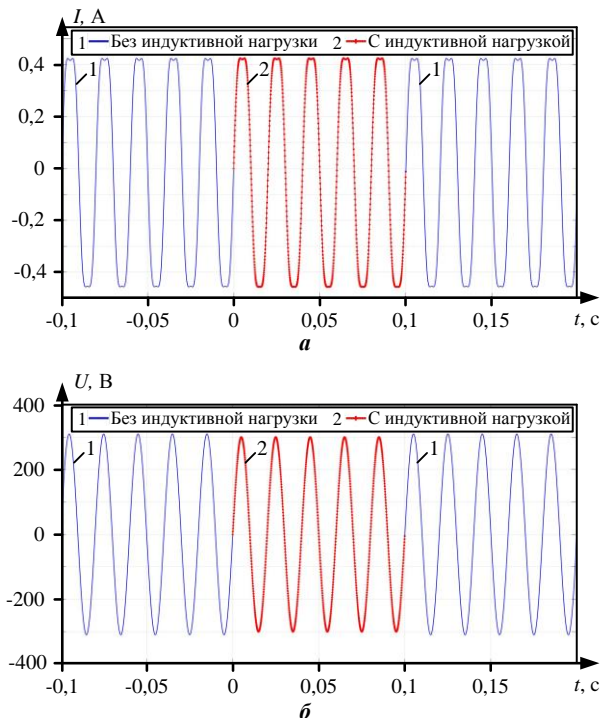


Рис. 6. Изменение тока (а) и напряжения (б) на светодиодном светильнике при переходном процессе

Необходимо отметить наличие разрыва в кривых тока и напряжения, наиболее заметных в момент отключения индуктивной нагрузки: при переходном процессе происходит разрыв кривой тока, протекающего через светодиодный светильник. Несмотря на то, что в абсолютных значениях изменение тока составляет порядка 20 мА, в том случае, если индуктивная нагрузка будет нелинейной, в момент коммутации характер изменения тока при переходе из одного состояния в другое может носить скачкообразный характер: изучение данного вопроса требует проведения отдельного исследования.

Интерес также представляет поведение светодиодных светильников при смене знака мнимой части комплекса напряжения. В связи с тем, что при проведении измерения производилось усреднение потребляемой мощности в интервале 10 минут, в момент включения дополнительной индуктивной нагрузки потребляемая мощность может быть существенно выше. В связи с этим были рассчитаны режимы работы осветительной сети при подключении и отключении индуктивной нагрузки $Z_{инд} = 0,1 \cdot (52,6 + 12,7j)$, что соответствует более мощной нагрузке. Изменение напряжений на светильниках в этом случае в графическом виде представлено на рис. 7. Изменение тока, протекающего через светильник, показано на рис. 8.

Разрыв в мгновенном значении тока при отключении индуктивной нагрузки увеличивается, что может приводить к ускоренному выходу светильников из строя. При этом величина изменения тока зависит также от момента коммутации (рис. 9).

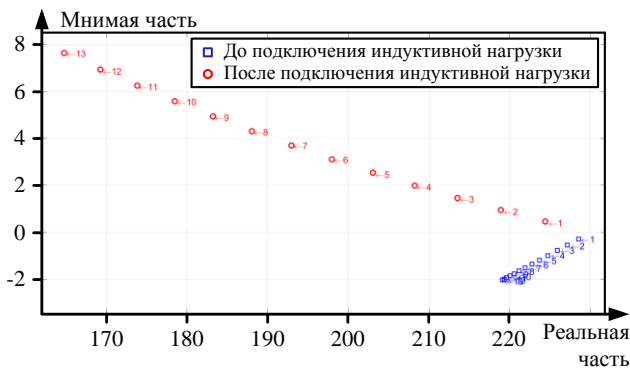


Рис. 7. Изменение напряжения на светильниках при подключении мощной индуктивной нагрузки

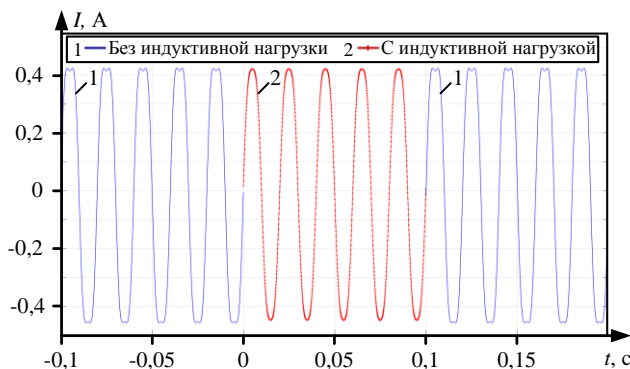


Рис. 8. Изменение тока, протекающего через светодиодный светильник

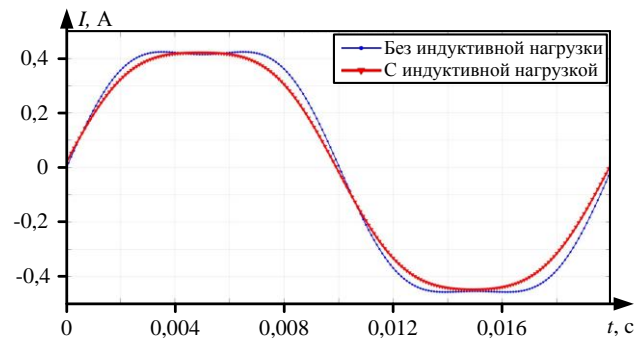


Рис. 9. Форма кривых тока, проходящих через светильник

Из рис. 9 видно, что изменение тока в светильнике при переходном процессе существенно зависит от момента подключения сторонней индуктивной нагрузки. Также можно наблюдать, что изменяется фаза тока. Подобные резкие изменения тока могут приводить к ускоренному выходу светильников из строя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании возможности возникновения резонансных явлений в сетях со светодиодными светильниками были сделаны следующие выводы:

1. Опыт использования светодиодных светильников на промышленных предприятиях показывает, что при параллельном включении бытовых индуктивных нагрузок со светодиодными светильниками большой мощности возможен систематический выход последних из строя. Анализ показателей качества электрической энергии в подобной сети показал, что причиной поломки светильников могут быть только резонансные явления в моменты коммутации.

2. Расчет режима работы осветительной сети показал, что при определенных комбинациях мощности светильников и подключаемой к ним индуктивности возможно возникновение явления смены знака мнимой части комплекса напряжения.

3. Анализ изменения мгновенных значений тока в ходе переходного процесса показал, что в момент коммутации в кривой тока наблюдается разрыв, следовательно, процесс изменения тока в это время может иметь непредсказуемый характер и приводить к ускоренному выходу светильников из строя.

Для исключения возможности возникновения резонансных явлений и ускоренного выхода светильников из строя, предлагается использование независимой схемы питания, при которой осветительные линии отделены от других потребителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кузьменко В.П., Солёный С.В. Исследование влияния светодиодных прожекторов на качество электрической энергии // Омский научный вестник. 2021. № 2(176). С. 15-19. doi: 10.25206/1813-8225-2021-176-15-19.
- Боярская Н.П., Довгун В.П. Влияние светодиодных источников света на спектры токов и напряжений питающей сети // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2014. № 3(90). С. 195-199.
- Оценка влияния осветительной нагрузки на показатели несинусоидальности напряжения и потребляемого тока /

- О.Г. Широков, Т.В. Алферова, В.В. Бахмутская, И.Ю. Орлов // *Агротехника и энергообеспечение*. 2018. № 2(19). С. 28-40.
4. Влияние светодиодных источников света на содержание гармоник тока и напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Алферов, Е.А. Якимов, О.Г. Широков, Т.В. Алферова // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*. 2016. № 3(66). С. 67-73.
 5. Харитонов М.С., Решетников Г.А. Результаты исследований особенностей применения светодиодного освещения на промышленном предприятии // *Вестник молодежной науки*. 2016. №3(5). С. 13.
 6. Радкевич В.Н., Михайлова Я.В. Характеристики электропотребления светодиодных световых приборов и их учет при расчете электрических сетей // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2016. № 4. С. 289-300. doi: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-289-300
 7. Сактоев В.Е., Баташов А.И., Чередов Э.Н. Исследование характеристик светодиодного светильника RC-R251-001 // *Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления*. 2017. № 1(64). С. 49-55.
 8. Обзор современных исследований по идентификации резонансных режимов, возникающих в элементах электрических сетей промышленного предприятия и коммунально-бытового сектора / Д.В. Коваленко, Е.А. Пугачева, Д.А. Рогозина, А.Е. Фридрих // *Омский научный вестник*. 2018. № 6(162). С. 103-107. doi: 10.25206/1813-8225-2018-162-103-107
 9. Суднова В.В., Пригода В.П. Оценка возможности возникновения резонанса в питающей сети светодиодных экранов московского Ледового дворца // *Промышленная энергетика*. 2007. № 9. С. 35-43.
 10. Преимущества и недостатки ретрофита уличного освещения при установке светодиодных светильников, а также их влияние на потери активной мощности в трансформаторах распределительных сетей / А.И. Троицкий, С.С. Костинский, В.И. Власенко, Т.З. Химишев // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2016. № 2(190). С. 53-61. doi: 10.17213/0321-2653-2016-2-53-61
 11. Валиуллин К.Р. Имитационное моделирование электротехнической системы уличного освещения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. №4(41). С. 48-55. doi: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-48-55

Поступила в редакцию 22 сентября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

RESEARCH OF RESONANCE IN CIRCUITS WITH LED LAMPS

Kamil R. Valiullin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical and Thermal Power Engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia, ValiullinKamil91@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5053-6370>

The paper considers the possibility of resonance phenomena in lighting networks with powerful LED lamps and inductive loads. An analysis of the operation of LED lamps at an industrial enterprise was carried out, which showed that the presence of outside active-inductive loads in the lighting network causes accelerated failure of lighting devices, even if energy system meets the standards of electrical energy quality. To study the processes taking place during switching, an algorithm for calculating the operating mode of the lighting network is proposed, which makes it possible to calculate the luminaire operation mode before and after switching other loads. For a LED lamp, oscillograms of current and voltage were taken, an expression was obtained that approximates the I - V characteristic of the LED lamp. Taking into account the I - V characteristic, the changes in the current curve of the lamps before and after the connection of an external inductive load were analyzed: the presence of a gap in the current value at the moment of switching, showed that the transient process can be resonant and cause the accelerated failure of lamps.

Keywords: LED lights, resonance, electrical energy quality.

REFERENCES

1. Kuzmenko V.P., Solyoniy S.V. Influence of LED floodlights on the electrical energy quality. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2021, no. 2 (176). pp. 15-19. doi: 10.25206/1813-8225-2021-176-15-19 (In Russian)
2. Boyarskaya N.P., Dovgun V.P. Influence of LED light sources on the spectra of currents and voltages in the supply network. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of KrasGAU], 2014, no. 3, pp. 195-199. (In Russian)
3. Широков О.Г., Алферова Т.В., Бахмутская В.В., Орлов И.Ю. Assessment of lighting load influence on the indices of non-sinusoidal voltage and consumed current. *Agrotekhnika i energoobespechenie* [Agricultural engineering and energy supply], 2018, no. 2(19), pp. 28-40. (In Russian)
4. Alferov A.A., Yakimov E.A., Shirokov O.G., Alferova T.V. LED light source influence on the content of current and voltage harmonics in power supply systems at industrial enterprises. *Vestnik Gomelskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo* [Bulletin of Sukhoi Gomel State Technical University], 2016, no. 3(66), pp. 67-73. (In Russian)
5. Kharitonov M. S., Reshetnikov G. A. Research results of LED lighting application features at an industrial enterprise. *Vestnik molodezhnoy nauki* [Bulletin of youth science], 2016, no. 3(5), pp. 13. (In Russian)
6. Radkevich V.N., Mikhailova Ya.V. Characteristics of electrical consumption of LED lighting devices and their consideration in the calculation of electrical networks. *Energetika. Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij i energeticheskikh obyedinenij SNG*. [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations], 2016, no. 4, pp. 289-300. doi: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-289-300. (In Russian)
7. Saktov V.E., Batashov A.I., Cheredov E.N. Research of characteristics of LED lamp RC-R251-001. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologij i upravleniya* [ESSUTM Bulletin], 2017, no. 1(64), pp. 49-55. (In Russian)
8. Kovalenko D.V., Pugacheva E.A., Rogozina D.A., Fridrikh A.E. Review of modern research on the identification of resonance modes arising in the elements of electrical networks of industrial enterprises and the household sector. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2018, no. 6(162), pp. 103-107. doi: 10.25206/1813-8225-2018-162-103-107. (In Russian)
9. Sudnova V.V. Assessment of resonance possibility of the

- supply network of LED screens in the Moscow Ice Palace *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2007, no 9, pp. 35-43. (In Russian)
10. Troitsky A.I., Kostinsky S.S., Vlasenko V.I., Himishev T.Z. Advantages and disadvantages of street lighting re-trophy when installing LED lamps, as well as their effect on active power losses in distribution network transformers. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-caucasian region. Technical Sciences Series], 2016, no. 2 (190), pp. 53-61. doi: 10.17213/0321-2653-2016-2-53-61. (In Russian)
11. Valiullin K.R. Imitational modeling of a street lighting system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2018, no. 4 (41), pp. 48-55. doi: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-48-55. (In Russian)
-

Валиуллин К.Р. Исследование резонансных явлений в цепях со светодиодными светильниками // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 56-61. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-56-61](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-56-61)

Valiullin K.R. Research of Resonance in Circuits with Led Lamps. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 56-61. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-56-61](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-56-61)

Николаев А.А., Гилемов И.Г., Малахов О.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ИССЛЕДОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНОГО СТАНА

В работе предложена система управления активным выпрямителем (АВ) преобразователя частоты (ПЧ) с изменяемой частотой коммутации силовых ключей АВ, учитывающая изменение режимов работы электропривода клетки прокатного стана. В системе управления АВ применена широтно-импульсная модуляция (ШИМ) с удалением выделенных гармоник. При снижении нагрузки или работе электропривода на холостом ходу система управления АВ выбирает таблицу углов переключения силовых ключей, соответствующую текущему режиму работы. Применение таблиц с увеличенной частотой переключения позволяет исключить из спектра потребляемого тока большее число гармоник, что положительно сказывается на качестве напряжения питающей сети. Предложен способ переключения таблиц на основе сравнения действующего значения тока АВ с заранее определёнными граничными значениями, полученными с применением разработанной методики анализа теплового баланса тиристоров. Имитационное моделирование производилось в программном пакете Matlab-Simulink на комплексной математической модели внутренней распределительной сети металлургического предприятия, имеющего электропривод с ПЧ-АВ. Особенностью данной питающей сети является наличие сложных резонансных явлений. Сравнительный анализ данных, полученных при имитационном моделировании для цикла работы прокатного стана с электроприводом на базе ПЧ-АВ, показал положительный технический эффект на качество напряжения питающей сети 10 кВ при работе электропривода стана на холостом ходу или при сниженной нагрузке.

Ключевые слова: активный выпрямитель, преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, показатели качества электроэнергии, электромагнитная совместимость, система управления, режим работы электропривода.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема электромагнитной совместимости мощных электроприводов (ЭП) на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ с АВ) стала актуальной в связи с их широким внедрением в металлургической промышленности [1-5]. Эти преобразователи стали использоваться в главных ЭП станов холодной и горячей прокатки. В связи с растущими запросами рынка к размерам и качеству проката, а также производительности станов главные ЭП клетей выполняются на значительные мощности, достигающие более 12 МВт [2, 4, 5]. Учитывая то, что для обеспечения высокой производительности прокатные станы выполняются многоклетевыми, суммарная мощность ЭП может составлять более 50 МВт [5].

Работа столь мощных потребителей несинусоидального тока часто оказывает существенное негативное влияние на питающую сеть, что приводит к ненормальной работе других потребителей электрической энергии в распределительной сети предприятия или возникновению аварийных ситуаций [5-7]. Для снижения негативного влияния ПЧ-АВ на питающую сеть применяют различные методы: 1) создание «грязной» секции в системе электроснабжения, питающей ПЧ; 2) установка устройств компенсации реактивной мощности; 3) повышение мощности питающих трансформаторов. Следует отметить, что подобные решения подразумевают значительные капитальные затраты, поэтому широкое распространение получили специальные алгоритмы широтном-импульсной модуляции (ШИМ) силовых ключей АВ, а именно ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ) или ШИМ с подавлением выделенных гармоник (ШИМ с ПВГ) [8-11]. Применение данных алгоритмов ШИМ позво-

ляет снизить величины некоторых гармоник в спектре потребляемого ПЧ тока или полностью исключить их. Однако количество гармоник, подлежащих исключению или подавлению, ограничено возможностью отыскания математического решения сложных систем уравнений. Для ШИМ с УВГ система уравнений в общем случае имеет следующий вид [8, 9, 11]:

$$\begin{cases} \cos(a_1) - \cos(a_2) + \cos(a_3) + \dots + \cos(a_n) = \mu; \\ \cos(m_1 a_1) - \cos(m_1 a_2) + \cos(m_1 a_3) + \dots \\ \dots + \cos(m_1 a_n) = 0; \\ \dots \\ \cos(m_{n-1} a_1) - \cos(m_{n-1} a_2) + \cos(m_{n-1} a_3) + \dots \\ \dots + \cos(m_{n-1} a_n) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где a_i – угол переключения силового ключа АВ; m_i – номер гармоники, подлежащей исключению; n – число углов переключения за четверть периода.

Как правило, число гармоник, подлежащих исключению, составляет $n-1$. Значит, для исключения большего числа гармоник требуется увеличить число переключений за четверть периода, т.е. частоту коммутации силовых ключей.

Современные преобразователи строятся на базе полностью управляемых полупроводниковых ключей: IGBT-транзисторах или IGCT-тиристорах [1, 12-14]. При значительных мощностях ПЧ применяют жидкостное охлаждение таких ключей, т.к. выделяемая тепловая мощность может достигать нескольких сотен киловатт. Увеличение частоты коммутации силовых ключей приводит к увеличению потерь энергии в них. Производители ПЧ при пуско-наладке производят тепловой расчёт возможности работы АВ на заданной частоте коммутации при текущей системе охлаждения.

В случае если возникает необходимость улучшить качество напряжения во внутренней распределительной сети предприятия при работе мощных ПЧ с АВ, тепловой баланс полупроводниковых ключей вносит ограничения в возможность значительного увеличения частоты коммутации, а значит, и числа устраняемых гармоник.

В предыдущей работе [5] была рассмотрена проблема ЭМС мощных ПЧ-АВ прокатного стана с внутризаводской питающей сетью, имеющей сложный резонанс в частотной характеристике. В результате чего гармоники, генерируемые АВ ПЧ, многократно усиливались на шинах главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия, что оказывало существенное влияние на работу остальных потребителей. Для решения данной проблемы были рассчитаны новые таблицы углов переключения силовых ключей с учётом исключения гармоник, попадающих в зону основного резонанса на шинах секций ГПП. Это позволило практически в 2 раза улучшить качество напряжения в точке общего подключения потребителей.

В работе [15] для того же объекта исследований был произведен анализ качества напряжения на секциях распределительной подстанции (РП), от которой получают питание ЭП прокатного стана, и секциях ГПП на протяжении всего цикла прокатки. Имитационное моделирование показало, что величины суммарного коэффициента гармонических составляющих (СКГС) при работе стана на холостом ходу для секций РП превышают величины при прокатке листа, для секций ГПП – остаются примерно на том же уровне.

Учитывая то, что при работе ПЧ-АВ на холостом ходу ток, протекающий через силовые ключи, относительно мал, на основании разработанной ранее системы управления АВ с выбираемыми таблицами углов переключения [16] была предложена идея реализовать систему управления АВ с изменяемой частотой коммутации силовых ключей в зависимости от режима работы ЭП.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ЧАСТОТОЙ КОММУТАЦИИ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ

На рис. 1 представлена обобщённая структурная схема предлагаемой усовершенствованной системы управления АВ. В правой части рисунка изображена типовая силовая схема ЭП с ПЧ-СД. Для реализации двенадцатипульсовой схемы выпрямления применены два понизительных трансформатора Т1 и Т2 с различными группами соединения вторичных обмоток, обеспечивающими сдвиг напряжения на 30°. Питание трансформаторов осуществляется от питающей сети 10 кВ через вакуумный выключатель Q1. Датчик тока ДТ необходим для измерения величин фазных токов АВ i_{abc} . Реакторы Р1 и Р2 служат для сглаживания токов и обеспечения работоспособности АВ. Напряжение на синхронный двигатель СД формирует автономный инвертер напряжения АИН. Трансформатор Т3, запитанный через вакуумный выключатель Q2, служит для питания тиристорного возбудителя ТВ, регулирующего ток в обмотке возбуждения ОВ синхронного двигателя.

Система регулирования реализована двухконтурной: внешний контур – регулятор напряжения РН в звене постоянного тока U_{DC} ; внутренний – регуляторы РТ токов i_d, i_q во вращающейся системе координат $dq0$. Для компенсации перекрёстных связей объекта регулирования применяется блок БКПС. Для преобразования величин в различные системы координат применены блоки $dq0/abc$ и $dq0/m\Theta$. Блок фильтра нижних частот ФНЧ используется для подавления высших гармонических составляющих фазных токов АВ. Для перехода во вращающуюся систему координат блок фазовой автоподстройки частоты ФАПЧ формирует опорный сигнал ωt , синхронизированный с сетевым напряжением U_C . Для измерения величин напряжений U_{abc} и U_{DC} применены датчики напряжения ДН.

В данной системе управления за основу был взят метод ШИМ с удалением выделенных гармоник, реализованный в блоке ШИМ.

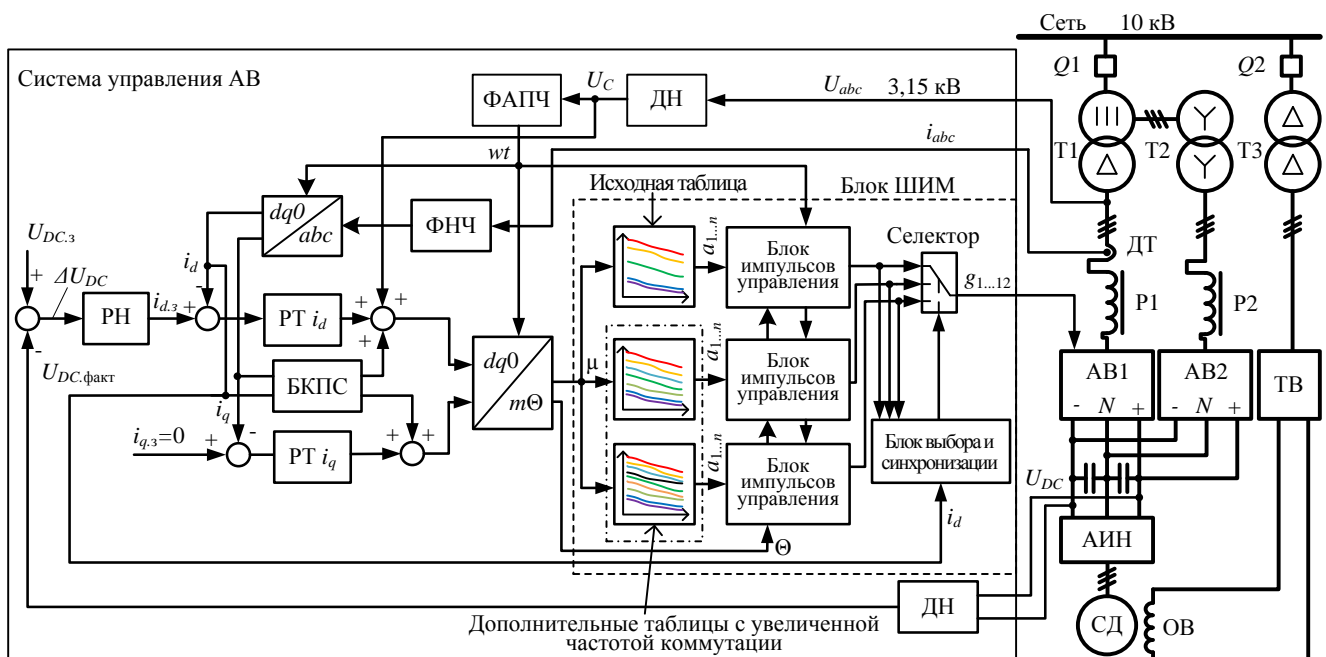


Рис. 1. Структурная схема разработанной системы управления АВ с изменяемой частотой коммутации силовых ключей, учитывающая режим работы электропривода

Однако исходный алгоритм был расширен двумя дополнительными таблицами с углами переключения силовых ключей с повышенной частотой коммутации. На каждую таблицу поступает величина вектора задания – коэффициент модуляции μ . На выходе таблицы формируются величины углов переключения $a_{1...n}$, соответствующие данному коэффициенту модуляции. Они поступают в блок импульсов управления, где формируются логические сигналы управления IGCT-тиристорами. Блок селектора позволяет отправлять в драйвера тиристоров логические сигналы управления, сформированные при использовании необходимой таблицы. Логический сигнал выбора необходимой таблицы формирует «Блок выбора и синхронизации» в зависимости от величины тока i_d , потребляемого АВ, и текущего и нового состояния ключей для минимизации числа переключений.

На рис. 2 представлена блок-схема блока выбора и синхронизации предлагаемой СУ АВ в обобщённом виде. На вход блока подаются логические сигналы управления тиристорами АВ с каждой таблицы $g_{1,1...12}$, $g_{2,1...12}$, ..., $g_{m,1...12}$; действующая величина тока АВ i_d , а также задаются граничные значения для каждой таблицы – i_2, i_3, \dots, i_m . Производя сравнение величины тока АВ с граничными значениями токов для каждой таблицы, блок выбора таблицы определяет номер необходимой таблицы n'_t . Номер следующей таблицы передаётся в блок сравнения и в блок памяти. Блок памяти хранит номер текущей таблицы n_t , передаёт его в блок сравнения и на выход блока выбора и синхронизации. Блок сравнения производит анализ текущего состояния тиристоров и их возможного состояния при переходе на новую таблицу. В момент времени, когда потребуется минимум переключений силовых ключей, блок сравнения формирует логический сигнал перехода на новую таблицу Sw . Этот сигнал поступает в блок памяти, который по его переднему фронту производит запоминание величины n'_t как n_t . При равенстве величин n'_t и n_t блок сравнения не производит формирования сигнала Sw .

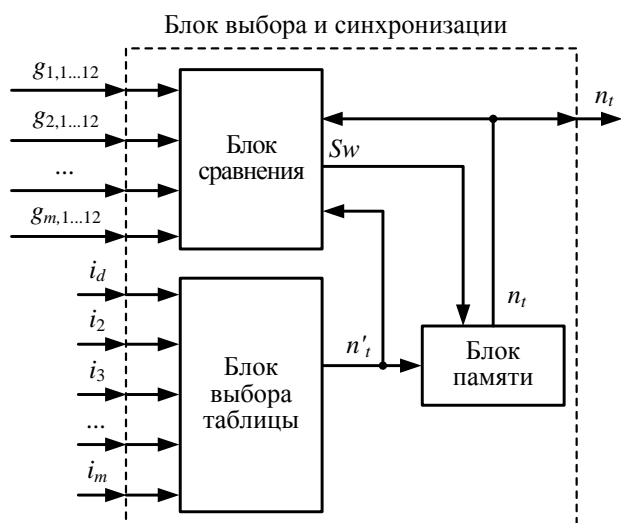


Рис. 2. Блок-схема блока выбора таблицы и синхронизации

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЕЛИЧИН ТОКОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ АВ

Важным этапом данной работы являлось корректное определение значений величин токов, при которых должны были сменяться таблицы углов переключения. Увеличение частоты коммутации силовых ключей приводит к их усиленному нагреву при равных величинах тока. Поэтому основным критерием является сохранение теплового баланса выделяемой на силовых ключах энергии и отводимой системой охлаждения для обеспечения устойчивой работы преобразователя.

Для выполнения расчётов были использованы спецификации [17] IGTC-тиристора 5SHY 55L4500 на 4,5 кВ и максимальной отключающей способностью 5 кА, производимого фирмами ABB Switzerland Ltd Semiconductors и Hitachi Energy Ltd. На рис. 3 приведены графики максимально допустимого тока данного тиристора в зависимости от частоты коммутации: красная кривая – при температуре окружающей среды $T_a = 50^\circ\text{C}$ и температуре корпуса тиристора $T_c < 80^\circ\text{C}$; черная кривая – при $T_a = 40^\circ\text{C}$ и $T_c < 80^\circ\text{C}$; голубой кривой показано ограничение по мощности источника питания драйвера тиристора $P_{GINMax} = 130$ Вт.

В качестве объекта, параметры которого учитывались при имитационном моделировании, так же как и в предыдущих работах [5, 15], был выбран действующий четырёхклетьевого стан холодной прокатки 1750 одного отечественного металлургического предприятия. Электроприводы первой клетки и моталки данного стана реализованы по 6-пульсной схеме и имеют по одному АВ. Изначально АВ ЭП клетки I имел частоту коммутации 150 Гц при номинальном токе в 2190 А (левая верхняя красная точка на рис. 3). Активный выпрямитель моталки рассчитан на работу с током в 834 А при частоте коммутации силовых ключей в 450 Гц (правая красная точка на рис. 3). Учитывая то, что оба данных преобразователя имеют идентичные системы охлаждения через эти две точки была проведена кривая 1, повторяющая характер графиков спецификации тиристора. Учитывая кривую 1, были определены граничные значения токов для каждой частоты коммутации и построены кривые I и III для АВ клетки I и моталки соответственно.

Аналогично была получена кривая II для АВ ЭП клеток 2, 3 и 4, которые реализованы по 12-пульсной схеме и имеют в своём составе по два АВ на ток в 960 А. Исходная частота коммутации тиристоров составляла 350 Гц. Повторяя характер кривых из спецификации, была построена кривая 2 максимально-допустимого тока.

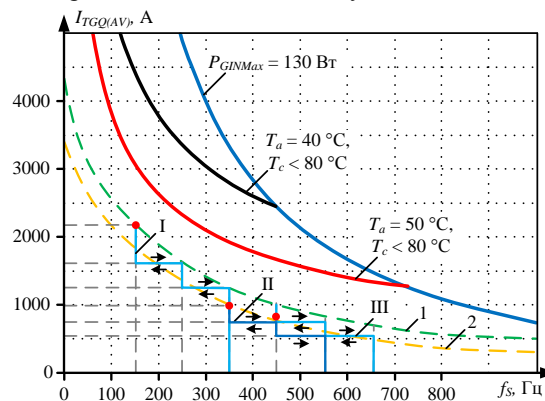


Рис. 3. Графики зависимости максимально допустимого тока IGCT-тиристора 5SHY 55L4500 от частоты коммутации

Стоит отметить, что предложенный способ определения граничных значений токов в зависимости от частоты коммутации имеет приближенный характер. В ряде случаев при внедрении данной системы управления и для достижения её максимальной эффективности могут потребоваться дополнительные расчёты и практические тесты. Однако в некоторых случаях дополнительные расчёты могут быть затруднены из-за отсутствия в открытом доступе специфических параметров преобразователей и их компонентов. Также в рамках данной работы для упрощения имитационного моделирования для АВ были рассчитаны только по две дополнительные таблицы с увеличенной частотой коммутации силовых ключей. При необходимости их число может быть больше.

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРЕДЛАГАЕМОЙ СУ АВ

Имитационное моделирование производилось в программном пакете Matlab-Simulink с использованием ранее разработанной комплексной математической модели распределительной сети металлургического завода с учётом параметров ЭП прокатного стана, всех основных потребителей, кабельных линий, реакторов, понизительных трансформаторов и т.д. [5]. Имитационное моделирование производилось для всего цикла прокатки стана [15].

На рис. 4 показаны графики изменения суммарного коэффициента гармонических составляющих при работе стана при использовании различных алгоритмов ШИМ. Графики для исходных алгоритмов ШИМ и оптимальных были взяты из предыдущих исследований для возможности проведения сравнительного анализа. Оптимизация заключалась в исключении из спектра потребляемого тока гармоник, попадающих в зону основного резонанса на шинах секций ГПП. Именно эти таблицы углов переключения были взяты за основу при проведении данных исследований как базовые таблицы для номинальной нагрузки преобразователей.

На рис. 4, б представлены графики изменения СКГС для секции 1 распределительной подстанции, от которой получают питание ПЧ ЭП клетки 1 и 3. Видно, что при работе стана графики СКГС при использовании в АВ ШИМ с увеличенной частотой коммутации и использовании оптимальных таблиц полностью совпадают, т.к. применяются одни и те же таблицы. При динамических режимах разгона и торможения усовершенствованная СУ показывает несколько худший эффект, однако при работе ЭП на холостом ходу заметен значительный положительный технический результат.

На рис. 4, в показаны графики СКГС для секции 2 РП. Видно, что при разгоне, торможении и работе ЭП на холостом ходу использование таблиц с увеличенной частотой коммутации значительно увеличивает величину СКГС. Однако наиболее важное значение имеет величина СКГС на шинах секций ГПП, т.к. они являются точкой общего подключения внутризаводских потребителей электроэнергии. На рис. 4, а показано изменение величины СКГС для секций ГПП. Можно заметить, что применение предлагаемой СУ позволяет снизить более чем в 2 раза величину СКГС при стоянке стана, работе на заправочной скорости, что является важным, учитывая то, что время прокатки составляет только ~ 40 % от длительности цикла работы стана.

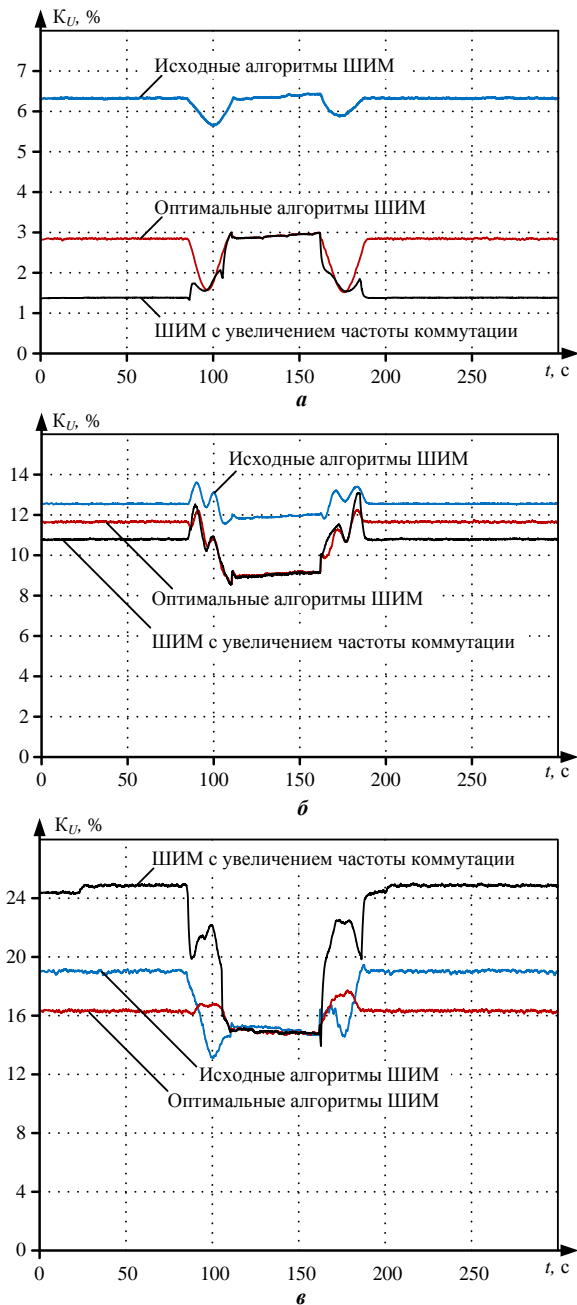


Рис. 4. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения для а) секций ГПП, б) секции 1 РП и в) секции 2 РП при использовании исходных, оптимальных и алгоритма ШИМ с увеличением частоты коммутации

Для удобства сравнения все величины СКГС для разных точек измерения, режимов работы стана и алгоритмов ШИМ представлены в таблице. Также указано процентное изменение для каждого показателя относительно исходных настроек ШИМ. Видно, что применение усовершенствованной системы управления с изменяемой частотой коммутации силовых ключей, учитывающей режимы работы электропривода, позволяет в ряде случаев добиться более значительного улучшения показателя качества электроэнергии в различных точках системы электроснабжения по сравнению с оптимальными настройками ШИМ, но что более важно – удаётся обеспечить значительное уменьшение СКГС в точке общего подключения внутризаводских потребителей.

Результаты исследований

Точка измерения	Описание	K _U , %		
		Исх.	Опт.	Ув. ч.
Секции 1 и 2 ГПП	Заправочная скорость	6,32	2,82 -55,4%	1,39 -78,0%
	Скорость прокатки	6,37	2,91 -54,3%	2,91 -54,3%
	Минимальная величина	5,66	1,51 -73,3%	1,33 -76,5%
	Максимальная величина	6,44	3,00 -53,4%	3,00 -53,4%
Секция 1 РП	Заправочная скорость	12,54	11,63 -7,25%	10,8 -13,9%
	Скорость прокатки	11,89	9,07 -23,7%	9,07 -23,7%
	Минимальная величина	11,57	8,54 -26,2%	8,56 -26,0%
	Максимальная величина	13,61	12,21 -10,3%	13,1 -3,75%
Секция 2 РП	Заправочная скорость	19,01	16,31 -14,2%	24,8 +30,5%
	Скорость прокатки	15,19	14,89 -1,97%	14,89 -1,97%
	Минимальная величина	13,12	14,69 +12%	13,9 +5,9%
	Максимальная величина	19,44	17,73 -8,8%	24,9 +28,1%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной работе была предложена система управления активным выпрямителем с изменяемой частотой коммутации силовых ключей в зависимости от режима работы электропривода. При реализации системы управления за основу был взят метод ШИМ с удалением выделенных гармоник.

2. Предложена методика определения граничных значений тока АВ в зависимости от частоты коммутации силовых ключей на основе данных из спецификации реального IGCT-тиристора. Подсчитаны величины граничных значений тока АВ в зависимости от частоты коммутации тиристорov для исследуемого объекта.

3. Рассчитаны по две дополнительные таблицы углов переключения силовых ключей с увеличенной частотой коммутации для каждого ЭП. Число дополнительных таблиц может быть большим, основное ограничение – обеспечение теплового баланса силовых ключей.

4. По результатам имитационного моделирования показан значительный положительный технический эффект по улучшению качества напряжения в точке общего подключения потребителей распределительной сети 10 кВ системы внутриводского электроснабжения металлургического предприятия.

5. Предлагаемая СУ позволяет значительно улучшить качество напряжения во внутриводской системе электроснабжения при работе ЭП с ПЧ-АВ на холостом ходу и наличии сложных резонансных явлений в распределительной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Retrofit of a hot rolling mill plant with three-level active front end drives / G. Alonso Orcajo, Josué Rodríguez D., José M. Cano, Joaquín G. Nornieilla, Pablo Ardura G., Rocío

Llera T., Diego Cifrián R. // IEEE Transactions on Industry Applications (May-June 2018). IEEE, 2018. № 54(3). Pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159

2. Храмов Т.Р., Корнилов Г.П. Крубцов Д.С. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. № 2. С. 48-53.

3. Reactive power compensation in industrial grid via high-power adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC VTB converters / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov, E.A. Maklakova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2017. № 8(4). Pp. 1455-1466

4. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клети толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 3. С. 16-25.

5. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill / A.A. Nikolaev, I.G. Gilemov, M.V. Bulanov, V.I. Kosmatov // XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). 2021. Pp. 1-8. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462264

6. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмов, Г. Никифоров, Ф.Ф. Муталлапова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. № 14(4). С. 96-105. doi: 10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105

7. Harmonic analysis of grid-tied active front end inverters for the frequency range of 0-9 kHz in distribution networks: addressing future regulations / H. Rathnayake, K. G. Khajeh, F. Zare, R. Sharma // IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2019. Pp. 446-451. doi: 10.1109/ICIT.2019.8755015

8. A flexible selective harmonic mitigation technique to meet grid codes in three-level PWM converters / L.G. Franquelo, J. Nápoles, R.C.P. Guisado, J.I. León, M.A. Aguirre // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. № 54(6). Pp. 3022-3029. doi: 10.1109/TIE.2007.907045

9. Research on hybrid SHEPWM based on different switching patterns / T. Jing, A. Maklakov, A. Radionov, S. Baskov, A. Kulmukhametova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2019. № 10 (4). Pp. 1875-1884. doi: 10.11591/ijpeds.v10.i4.pp.1875-1884.

10. Moeini A., Zhao H., Wang S. A current reference based selective harmonic current mitigation PWM technique to improve the performance of cascaded H-bridge multilevel active rectifiers // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65. Pp. 727-737. doi: 10.1109/TIE.2016.2630664

11. Jing T., Maklakov A., Radionov A. Two selective harmonic control techniques applied in 10kV grid with three-level NPC inverter // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). Magnitogorsk, 2019. Pp. 75-79. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915413

12. Improving the performance of protection schemes in three level IGCT-based neutral point clamped converters / A.V. Rocha, G.J. França, M.E. dos Santos, H. de Paula, B.J. Cardoso Filho // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2010. Pp. 2326-2332. doi: 10.1109/ECCE.2010.5617875

13. Shimada T., Taniguchi K. IGBT/MOSFET hybrid bridge with phase shift and frequency modulation control for a bidirectional series resonant converter // 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 EC-

- CE Europe). 2017. Pp. P.1-P.7. doi: 10.23919/EPE17ECSEEurope.2017.8099058
14. Ioffe I., Iunusov R., Kostylev A. The comparative analysis of processes in active front end (AFE) for cases of different power sources // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). 2019. Pp. 99-104. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915097
 15. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V. Influence investigation of electric drive operation mode at a rolling mill FC with AR on the 10kV supply network voltage quality // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021. Pp. 535-540. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559456
 16. Николаев А.А., Гилемов И.Г. Улучшение качества напряжения в электрических сетях с активными выпрямителями за счет выбора оптимальных таблиц углов переключения ШИМ // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №4(45). С. 35-42. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42)
 17. Официальный сайт «Hitachi Energy Ltd.». URL: <https://www.hitachienergy.com/ru/ru/offering/product-and-system/semiconductors/integrated-gate-commutated-thyristors-igct/asymmetric-and-reverse-conducting> (дата обращения 01.09.2021).

Поступила в редакцию 28 августа 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVED CONTROL SYSTEM ANALYSIS OF FREQUENCY CONVERTERS ACTIVE RECTIFIERS AS A PART OF ROLLING MILL ELECTRIC DRIVES

Alexander A. Nikolaev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, aa.nikolaev@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5014-4852>

Ildar G. Gilemov

Postgraduate Student, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia, gilemov.ig@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-2481-3378>

Oleg S. Malakhov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, o.malahov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2716-004X>

The paper proposes the control system for a frequency converter active rectifier with a variable switching frequency of the AR power switches, taking into account the changes in the operating modes of the rolling mill stand electric drive. In the AR control system, Selective Harmonic Elimination PWM is used. When the load is reduced or the electric drive is idle, the AR control system selects the table of switching angles of the power switches corresponding to the current operating mode. The use of tables with an increased switching frequency makes it possible to exclude a greater number of harmonics from the consumed current spectrum, which has a positive effect on the supply voltage power quality. A method is proposed for switching tables based on comparing the value of the AR current with predetermined limit values obtained using the developed technique for analyzing the thyristor thermal balance. Simulation modeling was carried out in the Matlab-Simulink software package on a complex mathematical model of the internal distribution network of a metallurgical enterprise, which has EDs with FC-AR. A feature of this supply network is the presence of complex resonance phenomena. Comparative analysis of the data obtained during simulation modeling for the cycle of operation of the rolling mill with electric drives based on FC-AR showed a positive technical effect on the power quality of the 10 kV supply network when the mill electric drive is idle or operates at reduced load.

Keywords: active rectifier, frequency converter, pulse width modulation, power quality, electro-magnetic capability, control system, electric drive operation mode.

REFERENCES

1. Alonso Orcajo G., Josué Rodríguez D., Cano José M., Norniella Joaquín G., Pablo Ardura G., Rocío Llera T., Diego Cifrián R. Retrofit of a hot rolling mill plant with three-level active front end drives. IEEE Transactions on Industry Applications (May-June 2018). IEEE. 2018, no. 54(3), pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159
2. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Krubtsov D.S. Evaluation of methods PWM voltage active rectifiers rolling mills. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 48-52. (In Russian)
3. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Maklakov A.S., Maklakova E.A. Reactive power compensation in industrial grid via high-power adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC BTB converters. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2017, no. 8(4), pp. 1455-1466.
4. Maklakov A.S. Simulation of the main electric drive of the plate mill rolling stand. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no. 3, pp. 16- 25. (In Russian)
5. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V., Kosmatov V.I. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill. XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). 2021, pp. 1-8. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462264
6. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Nikiforov G., Mutallapova F.F. Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric drives in the power supply system of industrial enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96-103. (In Russian)
7. Rathnayake H., Khajeh K.G., Zare F., Sharma R. Harmonic analysis of grid-tied active front end inverters for the frequency range of 0-9 kHz in distribution networks: addressing future regulations. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2019, pp. 446-451. doi: 10.1109/ICIT.2019.8755015
8. Franquelo L.G., Nápoles J., Guisado R.C.P., León J.I., Aguirre M.A. A flexible selective harmonic mitigation tech-

- nique to meet grid codes in three-level PWM converters. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007, no. 54(6), pp. 3022-3029. doi: 10.1109/TIE.2007.907045
9. Jing T., Maklakov A., Radionov A., Baskov S., Kulmukhametova A. Research on hybrid SHEPWM based on different switching patterns. International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2019, no. 10(4), pp. 1875-1884. doi: 10.11591/ijpeds.v10.i4.pp1875-1884
 10. Moeini A., Zhao H., Wang S. A current reference based selective harmonic current mitigation PWM technique to improve the performance of cascaded H-bridge multilevel active rectifiers. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018, vol. 65, pp. 727-737. doi: 10.1109/TIE.2016.2630664
 11. Jing T., Maklakov A., Radionov A. Two selective harmonic control techniques applied in 10kV grid with three-level NPC inverter. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). Magnitogorsk. 2019, pp. 75-79. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915413
 12. Rocha A.V., França G.J., dos Santos M.E., de Paula H., Cardoso Filho B.J. Improving the performance of protection schemes in three level IGCT-based neutral point clamped converters. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2010, pp. 2326-2332. doi: 10.1109/ECCE.2010.5617875
 13. Shimada T., Taniguchi K. IGBT/MOSFET hybrid bridge with phase shift and frequency modulation control for a bidirectional series resonant converter. 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe). 2017, pp. P.1-P.7. doi: 10.23919/EPE17ECCEurope.2017.8099058
 14. Ioffe I., Iunusov R., Kostylev A. The comparative analysis of processes in active front end (AFE) for cases of different power sources. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). 2019, pp. 99-104. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915097
 15. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V. Influence investigation of electric drive operation mode at a rolling mill FC with AR on the 10kV supply network voltage quality. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021, pp. 535-540. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559456
 16. Nikolaev A.A., Gilemov I.G. Improvement of Power Quality in Supply Network with Active Rectifiers by Selecting Optimal Switching Angle Tables of PWM. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 35-42. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42) (In Russian)
 17. Hitachi Energy Ltd. Available at: <https://www.hitachienergy.com/ru/ru/offering/product-and-system/semiconductors/integrated-gate-commutated-thyristors-igct/asymmetric-and-reverse-conducting> (accessed 01 September 2021)

Николаев А.А., Гилемов И.Г., Малахов О.С. Исследование усовершенствованной системы управления активных выпрямителей преобразователей частоты в составе электроприводов клетей прокатного стана // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 4(53). С. 62-68. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-62-68](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-62-68)

Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Malakhov O.S. Improved Control System Analysis of Frequency Converters Active Rectifiers as a Part of Rolling Mill Electric Drives. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 62-68. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-62-68](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-62-68)

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва**КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСТОЧНИКАМИ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ**

Мировые тенденции в энергетике значительно повлияли на развитие электроэнергетики в Российской Федерации. Одним из направлений будущего в электроэнергетике России является создание систем электроснабжения с источниками малой генерации, включая возобновляемые (солнечные и ветроэлектростанции). В связи с появлением большого числа источников малой генерации появится необходимость контролировать не только правовые и экономические отношения между отдельными участниками, но и технические. В Европе, США на сегодняшний день уже успешно работают платформы, позволяющие потребителям выбирать поставщика и генерирующую компанию, в Российской Федерации, в виду сложившейся традиционной структуры электроэнергетического комплекса, таких возможностей у потребителей электроэнергии практически не существует. Однако за последнее время появилось большое число исследований и разработок в области микрогенерации, как традиционной, так и возобновляемой. В данной работе кратко описана комплексная модель системы электроснабжения с разнородными источниками малой генерации, позволяющая в перспективе создать интеллектуальную модель рынка микрогенерации, учитывая при этом особенности состояния и режимов работы существующих систем электроснабжения, а также обеспечивающую поиск оптимального поставщика и/или производителя электроэнергии по критерию минимума тарифа на электроэнергию и максимума надежности электропередачи.

Ключевые слова: система электроснабжения, малая генерация, распределительная сеть, потери электроэнергии, надежность электроснабжения, параметры режима.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы глобального потепления повлияли на все сферы жизни общества и индустрии. В частности, в энергетике наблюдается тенденция перехода на чистые источники энергии, обеспечивающие сокращение углеродного следа.

В Российской Федерации только начали создаваться предпосылки для Энергоперехода 4.0 (анализ проблем и перспектив развития распределенной энергетики приведен в [1]):

- вводятся новые регулирующие документы, направленные на упрощение продажи мощности в сеть источниками малой генерации (11 декабря 2019 г. внесены изменения в федеральный закон № 35-ФЗ «... в части развития микрогенерации» (проект № 581324-7));
- организуются стратегические инициативы, поддерживающие проекты по исследованиям и разработкам в области распределенной энергетики (EnergyNet);
- утверждаются стратегии развития электроэнергетики в части ускорения ввода в эксплуатацию источников распределенной генерации (Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года).

Одним из ярких примеров, который является фундаментом для развития распределенной энергетики в РФ, является создание А-Платформы [2] – инструмента, позволяющего осуществлять взаимодействие между отдельными генерирующими источниками и сетью, создающего предпосылки появления рынков микрогенерации и активных потребителей в РФ.

Существующие исследования в данной области направлены на решения задач поиска оптимального места расположения [3-5], определения числа и мощ-

ности [4] источников в условиях систем электроснабжения, учитывая при этом существующую конфигурацию электрических сетей, уровень напряжения и допустимость режимов работы элементов после внедрения дополнительных источников.

Также при разработке моделей Microgrids рассматриваются вопросы влияния изменения нагрузки на основные их элементы, такие как генераторы малой мощности, накопители, а также создаются способы их компенсации [6].

Авторами [7] предлагается подход, позволяющий сокращать провалы напряжения в системах электроснабжения с источниками малой генерации за счет накопителей и источников электрической энергии.

Важными остаются и вопросы устойчивости источников распределенной генерации и внешней сети [8], а также их влияние на режимную надежность [9]. Согласно [9] в указанных системах должны быть обеспечены повышенные требования к устройствам релейной защиты и автоматики.

Актуальными являются вопросы бизнес-моделирования Microgrids. В [10] приводится модель системы электроснабжения с распределенной генерацией, построенная с точки зрения функционирования рынка микрогенерации, а также приведены основные ограничения по применению данной бизнес-модели в будущем.

Развитие систем электроснабжения с источниками малой энергетики является новым и перспективным для Российской Федерации.

В данной работе автором приводится комплексная модель Microgrid, учитывающая особенности режимов работы генераторов, электрических сетей, внешних источников и потребителей электроэнергии. Созданная модель направлена на разработку имитационной модели рынка микрогенерации, позволяющего не только

осуществлять быстрые расчеты по покупке электроэнергии, но и выбирать потребителями наилучшего поставщика и/или источник электроэнергии из возможных вариантов.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
С ИСТОЧНИКАМИ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ

В данной работе описан общий подход к созданию комплексной модели системы электроснабжения с источниками малой мощности. Система рассматривается как совокупность собственных малых источников мощности, внешних источников, потребителей и элементов электрических сетей.

Отдельные модели элементов системы спроектированы для решения оптимизационной задачи, направленной на поиск наилучшего источника электроэнергии (как внешнего, так и местного) с использованием метода динамического программирования. В общем виде оптимизационная задача имеет следующий вид:

$$\min (Z) = \min (\beta \cdot P + C_{\Delta W} + (\alpha_{(1)} + \alpha_{(2)} + \alpha_{(3)})Y), \quad (1)$$

где β – тариф на электроэнергию от конкретного поставщика, руб./кВт·ч; P – необходимая потребителю мощность, или мощность от внешнего источника, кВт; $C_{\Delta W}$ – стоимость потерь электроэнергии в системе электроснабжения, руб.; $\alpha_{(1)}, \alpha_{(2)}, \alpha_{(3)}$ – коэффициент надежности внешнего источника электрической энергии, собственных генераторов системы и элементов передачи мощности соответственно; Y – экономический ущерб от перерыва электроснабжения, руб.

На целевую функцию накладываются ограничения, отражающие баланс мощности в системе электроснабжения и допустимость параметров режима ее элементов. Система ограничений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \sum P_{ист} + \sum P_{GN} = P_{нагрузки} + \Delta P_{СЭС}, \\ U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}, \\ S_{i\min} \leq S_i \leq S_{i\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\sum P_{ист}$ – суммарная мощность источников распределенной генерации, кВт; $\sum P_{GN}$ – активная мощность, вырабатываемая собственными источниками системы электроснабжения, кВт; $P_{нагрузки}$ – нагрузка системы электроснабжения с распределенной генерацией, кВт; $\Delta P_{СЭС}$ – потери активной мощности в системе электроснабжения с учетом мощности, принимаемой от внешнего источника, кВт; $U_{i\min}, U_{i\max}$ – предельно допустимые потери напряжения в узле ($\pm 10\%$ от номинального значения), кВ; $S_{i\min}, S_{i\max}$ – минимально и максимально допустимое значение мощности, протекающей по элементам электрической сети, определяется нагрузочной способностью, кВА.

Модели отдельных элементов системы электроснабжения целесообразнее представлять в табличном виде, что обеспечит упрощение ввода исходных данных и реализацию алгоритма оптимизации, основанного на методе динамического программирования.

Модели элементов системы электроснабжения представлены в табл. 1-4.

Таблица 1

Модель внешнего источника электроэнергии

P , кВт	P_1	P_2	P_3	...	P_n
β , руб./кВт·ч	β_1	β_2	β_3	...	β_n
ΔP , кВт	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	...	ΔP_n
$\alpha_{(1)}$	$\alpha_{(1)1}$	$\alpha_{(1)2}$	$\alpha_{(1)3}$...	$\alpha_{(1)n}$

Таблица 2

Модель собственных источников электроэнергии

P , кВт	P_1	P_2	P_3	...	P_n
β , руб./кВт·ч	β_1	β_2	β_3	...	β_n
$\alpha_{(2)}$	$\alpha_{(2)1}$	$\alpha_{(2)2}$	$\alpha_{(2)3}$...	$\alpha_{(2)n}$

Таблица 3

Модель потребителя

P , кВт	P_1	P_2	P_3	...	P_n
Z , руб.	Z_1	Z_2	Z_3	...	Z_n

Таблица 4

Модель поставщика электроэнергии

P , кВт	P_1	P_2	P_3	...	P_n
β , руб./кВт·ч	β_1	β_2	β_3	...	β_n
ΔP , кВт	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	...	ΔP_n
$\alpha_{(3)}$	$\alpha_{(3)1}$	$\alpha_{(3)2}$	$\alpha_{(3)3}$...	$\alpha_{(3)n}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведена комплексная модель системы электроснабжения с источниками малой генерации, каждый из элементов которой (источник, нагрузка, распределительные сети) представлен в виде зависимостей, позволяющих создать модель рынка микрогенерации, а также осуществлять контроль и анализ параметров отдельных элементов системы электроснабжения как с экономической, так и с технической точки зрения.

Модель позволяет осуществлять задачи поиска потребителями электроэнергии от оптимальных (экономически выгодных и надежных, с точки зрения потребителей) поставщиков и источников энергии.

Важным также является применение данной модели при проектировании новых и реконструкции существующих систем электроснабжения с источниками малой генерации, что обеспечивает уже на этапе проектирования оптимальную конфигурацию сети, учитывающую надежность и экономичность передачи электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никулин П.А. Проблемы и перспективы развития распределенной генерации в Российской Федерации // Экономика и социум. 2018. №6(49). С. 802-804.
2. Официальный сайт «А-Платформа – Российская программная платформа управления распределенной энергетикой». URL: <https://a-platform.ru/> (дата обращения 10.10.2021)
3. Research on distributed generation source placement / Z. Jun-fang, D. Si-min, H. Yin-li, H. Guang // International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. 2009. Pp. 1-4. doi: 10.1109/SUPERGEN.2009.5347869
4. Оптимизация местоположения и мощности малой генерации в распределительных сетях / С.А. Ерошенко, А.А. Карпенко, С.Е. Кокин, А.В. Паздерин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. №1-2. С. 82-89.
5. Технико-экономическое обоснование места установки источников распределенной генерации / А.В. Варганова, Ю.М. Байрамгулова, И.Н. Гончарова, О.А. Кроткова // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3(44). С. 68-72. doi: 10.18503/2311-8318-2019-3(44)-68-72
6. Combined power supply method for micro grid by use of several types of distributed power generation systems /

- J. Baba, S. Suzuki, S. Numata, T. Yonezu // European Conference on Power Electronics and Applications. 2005. Pp. 10. doi: 10.1109/EPE.2005.219399
7. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Van Huan Nguyen. Reduction in microgrids voltage dips based on power accumulators and controlled distributed generation plants // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2019. Pp. 24-28. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877687.
 8. The impact of distributed generation and its parallel operation on distribution power grid / Z. Kai, L. Kexue, Y. Naipeng, J. Yuhong, L. Wenjun, Q. Lihan // 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). 2015. Pp. 2041-2045. doi: 10.1109/DRPT.2015.7432575
 9. Liu J., Zhang J., Zhang D. Effect of distributed generation on power supply reliability of distribution network // 8th International Conference on Grid and Distributed Computing (GDC). 2015. Pp. 32-35. doi: 10.1109/GDC.2015.13
 10. Business model status of distributed power supply and its concerns in future development / Q. Zhang, J. Zhang, X. Han, X. Jin, H. Fu, T. Zang // IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2017. Pp. 1-5. doi: 10.1109/EI2.2017.8245542

Поступила в редакцию 28 августа 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INTEGRATED MODEL OF A POWER SUPPLY SYSTEM WITH DISTRIBUTED GENERATION

Aleksandra V. Varganova

Ph.D(Eng.), Associate Professor, Industrial Electric Power Supply Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; Department of Management in Energy and Industry, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru

World trends in the energy sector influenced the trends and prospects for the development of electric power industry in the Russian Federation. One of the directions of the future in Russia's electric power industry is the development of power supply systems with low-generation sources, including renewable (solar and wind power plants). Due to the advent of a large number of sources of small generation, there will be a need to control not only legal and economic relations between individual participants, but also technical. In Europe, the United States today has been successfully working platforms, allowing consumers to choose a supplier and a generating company, in the Russian Federation, in view of the current trailing structure of the electric power complex, there are practically no such possibilities for electricity consumers. However, recently has a large number of research and development in the field of microgeneration, both traditional and renewable. In this paper, a comprehensive model of the power supply system with diverse sources of small generation is briefly described, which allows the intellectual model of the microgeneration market in the future, given the characteristics of the state and modes of the existing power supply systems, as well as to search for the optimal supplier and / or electricity producer. The criterion of the minimum of the tariff for electricity and the maximum power reliability maximum.

Keywords: power supply system, small generation, distribution network, electricity loss, power supply reliability, mode parameters.

REFERENCES

1. Nikulin P.A. Problems and Prospects of Development of Distributed Generation in the Russian Federation. *Ekonomika i sotsium* [Economics and Society], 2018, no. 6(49), pp. 802-804. (In Russian)
2. *A-Platforma - Rossijskaya programmnaya platforma upravleniya raspredelyonnoj energetikoj* (A-Platform - Russian software platform management distributed energy). Available at: <https://a-platform.ru/> (accessed 27 June 2021)
3. Jun-fang Z., Si-min D., Yin-li H., Guang H. Research on distributed generation source placement. 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. 2009. pp. 1-4. doi: 10.1109/SUPERGEN.2009.5347869
4. Eroshenko S.A., Karpenko A.A., Kokin S.E., Pazderin A.V. Optimization of Location and Power of Small Generation in Distribution Networks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Proceedings of higher educational establishments. Energy problem], 2012, no. 1-2, pp. 82-89. (In Russian)
5. Varganova A.V., Bayramgulova Yu.M., Goncharova I.N., Krotkova O.A. Technical and economic substantiation of the place of installation of sources of distributed generation. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 68-72. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2019-3(44)-68-72
6. Baba J., Suzuki S., Numata S., Yonezu T. Combined power supply method for micro grid by use of several types of distributed power generation systems. 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, 2005, pp. 10. doi: 10.1109/EPE.2005.219399
7. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Van Huan Nguyen. Reduction in Microgrids Voltage Dips Based on Power Accumulators and Controlled Distributed Generation Plants. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019, pp. 24-28. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877687
8. Kai Z., Kexue L., Naipeng Y., Yuhong J., Wenjun L., Lihan Q. The impact of distributed generation and its parallel operation on distribution power grid. 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2015, pp. 2041-2045. doi: 10.1109/DRPT.2015.7432575
9. Liu J., Zhang J., Zhang D. Effect of Distributed Generation on Power Supply Reliability of Distribution Network. 2015 8th International Conference on Grid and Distributed Computing (GDC), 2015, pp. 32-35. doi: 10.1109/GDC.2015.13
10. Zhang Q., Zhang J., Han X., Jin X., Fu H., Zang T. Business model status of distributed power supply and its concerns in future development. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/EI2.2017.8245542

Варганова А.В. Комплексная модель системы электроснабжения с источниками малой генерации // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 4(53). С. 69-71. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-69-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-69-71)

Varganova A.V. Integrated Model of a Power Supply System with Distributed Generation. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 69-71. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-69-71](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-69-71)

УЧЕТ ЕМКОСТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ОДНОЦЕПНОЙ ЛЭП С ГРОЗОТРОСАМИ

Наибольшую сложность при расчете параметров режима однофазного короткого замыкания в сети с эффективно заземленной нейтралью с целью дистанционного определения места повреждения представляет моделирование линий электропередачи. Математическая модель ЛЭП должна учитывать не только сопротивление проводников и грозотросов, но их электростатическое и электромагнитное взаимодействие. В системах электроснабжения эта задача дополнительно усложняется несимметричным расположением проводящих элементов на опоре и отсутствием транспозиции. Таким образом, актуальной является задача разработки уточненной математической модели ЛЭП, учитывающей перечисленные выше факторы. В работе предложена комбинированная схема замещения емкостной составляющей одноцепной ЛЭП с двумя грозотросами, основанная на сочетании методов симметричных составляющих и фазных координат

Ключевые слова: линия электропередачи, схема замещения, поперечная емкость, фазные координаты, симметричные составляющие, промышленное электроснабжение, однофазное короткое замыкание.

ВВЕДЕНИЕ

Решение такой задачи, как дистанционное определение места повреждения при однофазном коротком замыкании, требует применения математической модели ЛЭП, учитывающей электромагнитное и электростатическое взаимодействие ее проводящих элементов. Наиболее распространенным подходом к моделированию линий в таком случае является использование метода симметричных составляющих и моделей ЛЭП, приведенных в действующих руководящих указаниях [1]. Однако необходимо учитывать, что метод симметричных составляющих основан на предположении, что ток, протекающий по элементу электрической цепи, можно разложить на составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности в том случае, если сам этот элемент является симметричным. Это не позволяет учесть возможную несимметрию сопротивлений ЛЭП, обусловленную несимметричным расположением проводов и тросов на опоре друг относительно друга. Это особенно актуально в условиях систем промышленного электроснабжения, где линии электропередачи 110-220 кВ не имеют транспозиции. Учет несимметрии сопротивлений ЛЭП возможен при использовании метода фазных координат.

Данный метод широко используется для моделирования режимов в условиях энергосистем. Так, в [2] авторы предлагают математическую модель многоцепной несимметричной воздушной ЛЭП, ориентированную на расчеты параметров установившихся режимов. В работе [3] авторами предложена математическая модель ЛЭП с симметрирующим устройством. Авторы [4] использовали программный комплекс MATLAB для составления универсальной математической модели высоковольтной линии электропередачи. Однако такой подход не позволяет моделировать ЛЭП совместно с многомашинной системой, что существенно ограничивает возможности по ее использованию. Данный инструмент использован также в [5] для моделирования режима однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью. Авторы [6] разработали математическую модель двухцепной ЛЭП в фазных координатах для расчета установившегося режима

и определения потерь. В [7] метод фазных координат использован для оценки электрических параметров двенадцатицепной ЛЭП. Авторы [8] предложили использовать метод фазных координат для определения поперечной емкости ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения. В [9] авторы также учли зависимость сопротивления ЛЭП от частоты.

Рассмотренные модели ЛЭП и алгоритмы расчета параметров режима, в которых они использованы, не учитывают особенностей систем промышленного электроснабжения и ориентированы на сложноразветвленные сети энергосистем. В данной работе предложена комбинированная схема замещения одноцепной ЛЭП с двумя грозотросами для расчетов параметров режима однофазного короткого на ЛЭП в системе электроснабжения с преобладанием разомкнутых участков сети 110-220 кВ, коротких нетранспонированных линий и наличием нескольких источников электрической энергии и узлов примыкания к энергосистеме. Предложенная схема замещения основана на сочетании методов фазных координат и симметричных составляющих [10] и, таким образом, позволяет одновременно учесть несимметрию ЛЭП и выполнять расчет параметров режима в симметричных составляющих, что значительно упрощает расчет и схему замещения.

КОМБИНИРОВАННАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

Для определения поперечной емкости одноцепной ЛЭП с двумя грозотросами использовано сочетание методов зеркального изображения и фазных координат. В соответствии с этим составлена матрица потенциальных коэффициентов:

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_{AA} & \alpha_{AB} & \alpha_{AC} & \alpha_{AT_1} & \alpha_{AT_2} \\ \alpha_{AB} & \alpha_{BB} & \alpha_{BC} & \alpha_{BT_1} & \alpha_{BT_2} \\ \alpha_{AC} & \alpha_{BC} & \alpha_{CC} & \alpha_{CT_1} & \alpha_{CT_2} \\ \alpha_{AT_1} & \alpha_{BT_1} & \alpha_{CT_1} & \alpha_{T_1T_1} & \alpha_{T_1T_2} \\ \alpha_{AT_2} & \alpha_{BT_2} & \alpha_{CT_2} & \alpha_{T_1T_2} & \alpha_{T_2T_2} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где α_{ii} – собственный потенциальный коэффициент провода либо грозозащитного троса, м/Ф; α_{ij} – взаимный потенциальный коэффициент, м/Ф.

Для определения собственных и взаимных потенциальных коэффициентов использованы известные выражения [1]:

$$\alpha_{ii} = 41,4 \cdot 10^6 \cdot \lg \frac{S_{ii}}{\rho_n}; \quad (2)$$

$$\alpha_{ij} = 41,4 \cdot 10^6 \cdot \lg \frac{S_{ij}}{D_{ij}}, \quad (3)$$

где S_{ii} – расстояние между проводом (тросом) и его зеркальным изображением, м; S_{ij} – расстояние между проводом одной фазы (тросом) и его зеркальным изображением провода другой фазы, м; ρ_n – действительный радиус провода фазы, м; D_{ij} – расстояние между проводниками фаз либо тросами, м.

Для преобразования матрицы потенциальных коэффициентов одноцепной ЛЭП с двумя грозозащитными тросами в симметричные составляющие необходимо разделить матрицу α на четыре подматрицы:

– подматрица собственных и взаимных потенциальных коэффициентов фазных проводников

$$\alpha_{\Pi} = \begin{pmatrix} \alpha_{AA} & \alpha_{BA} & \alpha_{CA} \\ \alpha_{AB} & \alpha_{BB} & \alpha_{CB} \\ \alpha_{AC} & \alpha_{BC} & \alpha_{CC} \end{pmatrix}; \quad (4)$$

– подматрицы взаимных потенциальных коэффициентов фазных проводников и тросов

$$\alpha_{\Pi\Gamma} = \begin{pmatrix} \alpha_{AT_1} & \alpha_{AT_2} \\ \alpha_{BT_1} & \alpha_{BT_2} \\ \alpha_{CT_1} & \alpha_{CT_2} \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$\alpha_{\Pi\Gamma}^T = \begin{pmatrix} \alpha_{AT_1} & \alpha_{BT_1} & \alpha_{CT_1} \\ \alpha_{AT_2} & \alpha_{BT_2} & \alpha_{CT_2} \end{pmatrix}; \quad (6)$$

– подматрица собственных и взаимных потенциальных коэффициентов грозозащитных тросов

$$\alpha_{\Gamma} = \begin{pmatrix} \alpha_{T_1T_1} & \alpha_{T_1T_2} \\ \alpha_{T_1T_2} & \alpha_{T_2T_2} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Пользуясь подматрицами (4)-(7), можно преобразовать матрицу потенциальных коэффициентов (1) в эквивалентную матрицу размерностью 3×3 :

$$\alpha_{(n)\Gamma} = \alpha_{\Pi} - \alpha_{\Pi\Gamma} \alpha_{\Gamma}^{-1} \alpha_{\Pi\Gamma}^T = \begin{pmatrix} \alpha_{AA(\Gamma)} & \alpha_{BA(\Gamma)} & \alpha_{CA(\Gamma)} \\ \alpha_{AB(\Gamma)} & \alpha_{BB(\Gamma)} & \alpha_{CB(\Gamma)} \\ \alpha_{AC(\Gamma)} & \alpha_{BC(\Gamma)} & \alpha_{CC(\Gamma)} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

В матрице (8):

– диагональные элементы

$$\alpha_{ii(\Gamma)} = \alpha_{ii} + \frac{\alpha_{T_2T_2} \alpha_{T_1}^2 + \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2}^2 - 2\alpha_{T_1T_2} \alpha_{T_1} \alpha_{T_2}}{\alpha_{T_1T_2}^2 - \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2}}; \quad (9)$$

– недиагональные элементы

$$\alpha_{ij(\Gamma)} = \alpha_{ij} + \frac{\alpha_{T_1} \alpha_{jT_1} \alpha_{T_2T_2} + \alpha_{T_2} \alpha_{jT_2} \alpha_{T_1T_1} - \alpha_{T_1T_2} X}{\alpha_{T_1T_2}^2 - \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2}}; \quad (10)$$

$$X = \alpha_{T_1} \alpha_{jT_2} + \alpha_{T_2} \alpha_{jT_1}.$$

Преобразование матрицы (8) в составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$\alpha_{S(\Gamma)} = \frac{1}{3} \mathbf{s}^{-1} \alpha_{(n)\Gamma} \mathbf{s} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_{12} & \alpha_{10} \\ \alpha_{21} & \alpha_2 & \alpha_{20} \\ \alpha_{01} & \alpha_{02} & \alpha_0 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где \mathbf{s} – матрица фазового поворота, содержащая оператор $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$.

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix}$$

Подставив (8) в (11), получим потенциальные коэффициенты одноцепной ЛЭП с двумя грозотросами:

– прямой (обратной) последовательности

$$\alpha_{1(2)} = \frac{A}{\alpha_{T_1T_2}^2 - \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2}}; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} A = & \alpha_{AA} \alpha_{T_1T_2}^2 + \alpha_{BB} \alpha_{T_1T_2}^2 + \alpha_{CC} \alpha_{T_1T_2}^2 - \\ & - \alpha_{AA} \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2} - \alpha_{BB} \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2} - \alpha_{CC} \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2} + \\ & + \alpha_{AT_1}^2 \alpha_{T_2T_2} - 2\alpha_{AT_1} \alpha_{AT_2} \alpha_{T_1T_2} + \alpha_{AT_1} \alpha_{BT_2} \alpha_{T_1T_2} + \\ & + \alpha_{AT_1} \alpha_{CT_2} \alpha_{T_1T_2} - \alpha_{AT_1} \alpha_{BT_1} \alpha_{T_2T_2} - \alpha_{AT_1} \alpha_{CT_1} \alpha_{T_2T_2} + \\ & + \alpha_{AT_2}^2 \alpha_{T_1T_2} + \alpha_{AT_2} \alpha_{BT_1} \alpha_{T_1T_2} + \alpha_{AT_2} \alpha_{CT_1} \alpha_{T_1T_2} - \\ & - \alpha_{AT_2} \alpha_{BT_2} \alpha_{T_1T_1} - \alpha_{AT_2} \alpha_{CT_2} \alpha_{T_1T_1} + \alpha_{BT_1}^2 \alpha_{T_2T_2} - \\ & - 2\alpha_{BT_1} \alpha_{BT_2} \alpha_{T_1T_2} + \alpha_{BT_1} \alpha_{CT_2} \alpha_{T_1T_2} - \alpha_{BT_1} \alpha_{CT_1} \alpha_{T_2T_2} + \\ & + \alpha_{BT_2}^2 \alpha_{T_1T_2} + \alpha_{BT_2} \alpha_{CT_1} \alpha_{T_1T_2} - \alpha_{BT_2} \alpha_{CT_2} \alpha_{T_1T_1} + \alpha_{CT_1}^2 \alpha_{T_2T_2} - \\ & - 2\alpha_{CT_1} \alpha_{CT_2} \alpha_{T_1T_2} + \alpha_{CT_2}^2 \alpha_{T_1T_1} + \alpha_{AB} \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2} + \\ & + \alpha_{AC} \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2} + \alpha_{BC} \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2} - \alpha_{AB} \alpha_{T_1T_2}^2 - \alpha_{AC} \alpha_{T_1T_2}^2 - \\ & - \alpha_{BC} \alpha_{T_1T_2}^2; \end{aligned}$$

– нулевой последовательности

$$\alpha_0 = \frac{B}{\alpha_{T_1T_2}^2 - \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2}}; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} B = & \alpha_{AA} \alpha_{T_1T_2}^2 + \alpha_{BB} \alpha_{T_1T_2}^2 + \alpha_{CC} \alpha_{T_1T_2}^2 + \\ & + 2(\alpha_{AB} \alpha_{T_1T_2}^2 + \alpha_{AC} \alpha_{T_1T_2}^2 + \alpha_{BC} \alpha_{T_1T_2}^2) + \alpha_{AT_1}^2 \alpha_{T_2T_2} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +\alpha_{AT_2}^2 \alpha_{T_1T_1} + \alpha_{BT_1}^2 \alpha_{T_2T_2} + \alpha_{BT_2}^2 \alpha_{T_1T_1} + \alpha_{CT_1}^2 \alpha_{T_2T_2} + \\
 & +\alpha_{CT_2}^2 \alpha_{T_1T_1} - \alpha_{AA} \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2} - \alpha_{BB} \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2} - \\
 & -\alpha_{CC} \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2} + 2\left(\alpha_{AT_1} \alpha_{BT_1} \alpha_{T_2T_2} + \alpha_{AT_2} \alpha_{BT_2} \alpha_{T_1T_1} + \right. \\
 & +\alpha_{AT_1} \alpha_{CT_1} \alpha_{T_2T_2} + \alpha_{AT_2} \alpha_{CT_2} \alpha_{T_1T_1} + \alpha_{BT_1} \alpha_{CT_1} \alpha_{T_2T_2} + \\
 & \left. +\alpha_{BT_2} \alpha_{CT_2} \alpha_{T_1T_1}\right) - 2\left(\alpha_{AT_1} \alpha_{AT_2} \alpha_{T_1T_2} + \alpha_{AB} \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2} + \right. \\
 & +\alpha_{AT_1} \alpha_{BT_2} \alpha_{T_1T_2} + \alpha_{AT_2} \alpha_{BT_1} \alpha_{T_1T_2} + \alpha_{AC} \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2} + \\
 & +\alpha_{AT_1} \alpha_{CT_2} \alpha_{T_1T_2} + \alpha_{AT_2} \alpha_{CT_1} \alpha_{T_1T_2} + \alpha_{BT_1} \alpha_{BT_2} \alpha_{T_1T_2} + \\
 & +\alpha_{BC} \alpha_{T_1T_1} \alpha_{T_2T_2} + \alpha_{BT_1} \alpha_{CT_2} \alpha_{T_1T_2} + \alpha_{BT_2} \alpha_{CT_1} \alpha_{T_1T_2} + \\
 & \left. +\alpha_{CT_1} \alpha_{CT_2} \alpha_{T_1T_2}\right).
 \end{aligned}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена комбинированная схема замещения емкостной составляющей одноцепной ЛЭП с двумя грозотросами. Предложенная математическая модель позволяет учесть при расчете режима однофазного короткого замыкания несимметричное расположение проводящих элементов на опоре и их электростатическое взаимодействие. При этом модель ЛЭП в фазных координатах можно использовать совместно со схемой замещения электрической сети в симметричных составляющих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчет токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. М.: Энергия, 1979. 152 с.
2. Борисова Ю.А., Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г. О моделировании режимов несимметричных многоцепных воздушных линий // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы IX Междунар. молодежной науч.-технич. конференции. В 3-х т., Казань, 01–05 октября 2018 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. С. 229-232.

3. Попов Н.М., Петрищев М.В. Моделирование линии с симметрирующим устройством в фазных координатах // Труды международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». М.: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 2012. Т.1. С. 116-121.
4. Кабанов В.О. Моделирование высоковольтной линии электропередачи для определения предела передаваемой мощности // Энергия-2021: тезисы докладов Шестнадцатой всероссийской (восьмой международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 6-ти томах, Иваново, 06–08 апреля 2021 года. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2021. С. 17.
5. Дихно А.О., Макашева С.И. Моделирование электромагнитных процессов параллельных линий электропередачи при замыканиях в одной из них // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2019. Т. 2. С. 227-231.
6. Шишков Е.М. Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г. Влияние несимметрии параметров двухцепной воздушной линии электропередачи на установившиеся режимы // Электричество. 2013. № 4. С. 9-17.
7. Binsaroor A. S., Tiwari S. N. Evaluation of twelve-phase (multiphase) transmission line parameters // Electr. Power Syst. Res. 1988. Vol. 15. No. 1. Pp. 63-76.
8. Equivalent Circuit Parameters of Power Tap-Off from Insulated Shield Wires of High Voltage Transmission Lines at Different Rated Voltages / G. Qi, Y. Zheng, K. Xia, W. Wu, F. Liao, S. Shu // ICHVE 2018 - 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2019. 4 p.
9. Tavares M.C., Pissolato J., Portela C.M. New multiphase transmission line model // Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 1998. Pp. 489-494.
10. Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С. 35-40. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40

Поступила в редакцию 12 сентября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INTRODUCTION OF THE CAPACITIVE CONDUCTIVITY OF A NON-SYMMETRIC SINGLE-CIRCUIT LINE WITH GROUND WIRE

Evgeniya A. Panova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, ea.panova@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9392-3346>

The greatest difficulty in calculating the parameters of a single-phase short circuit mode in a network with an effectively grounded neutral for the purpose of remotely locating a fault is the modeling of power lines. The mathematical model of power transmission lines should take into account not only the resistance of conductors and ground wires, but their electrostatic and electromagnetic interaction. In power supply systems, this task is further complicated by the asymmetrical arrangement of conductive elements on the tower and the lack of transposition. Thus, the urgent task is to develop a refined mathematical model of power transmission lines, taking into account the above factors. The paper proposes a combined equivalent circuit for the

capacitive component of a single-circuit power transmission line with two ground wires, based on a combination of methods of symmetric components and phase coordinates.

Keywords: power line, equivalent circuit, transverse capacitance, phase coordinates, symmetrical components, industrial power supply, single-phase short circuit.

REFERENCES

1. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vyp. 11. Raschet tokov korotkogo zamykaniya dlya releynoy zashchity i sistemnoy avtomatiki v setyakh 110-750 kV* [Relay protection guidelines. Issue 11. Calculation of short-circuit currents

- for relay protection and system automation in 110-750 kV networks], Moscow, Energiya Publ., 1979. 152 p.
2. Borisova Yu.A., Vedernikov A.S., Gol'dshteyn V.G. Modeling the modes of asymmetric multi-circuit overhead lines. *Elektoenergetika glazami molodezhi* [Materials of the IX Intern. youth scientific and technical conference "Electric power industry through the eyes of youth"]. Kazan, Kazan State Power Engineering University Publ., 2018, pp. 229-232. (In Russian)
 3. Popov N.M., Petrishchev M.V. Modeling a line with a balun in phase coordinates. *Energoobespechenie i energosbere-zhenie v sel'skom khozyaystve* [Proceedings of the international scientific and technical conference "Energy supply and energy saving in agriculture"]. Moscow, All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization Publ., 2012, vol. 1, pp. 116-121. (In Russian)
 4. Kabanov V.O. Simulation of a high voltage power line to determine the limit of the transmitted power. *Energiya-2021* [Abstracts of the Sixteenth All-Russian (Eighth International) Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Energy-2021"]. Ivanovo, Ivanovo Power Engineering Institute Publ., 2021, pp. 17. (In Russian)
 5. Dikhno A.O., Makasheva S.I. Simulation of electromagnetic processes of parallel power transmission lines in case of short circuits in one of them. *Nauchno-tekhnikeskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the KSHI century]. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University Publ., 2019, vol. 2, pp. 227-231. (In Russian)
 6. Shishkov E.M., Vedernikov A.S., Gol'dshteyn V.G. The influence of the asymmetry of the parameters of a double-circuit overhead power transmission line on steady-state modes. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 2013, no. 4, pp. 9-17. (In Russian)
 7. Binsaroor A.S., Tiwari S.N. Evaluation of twelve-phase (multiphase) transmission line parametersю Electr. Power Syst. Res. 1988, vol. 15, no 1, pp. 63-76.
 8. Qi G., Zheng Y., Xia K., Wu W., Liao F., Shu S. Equivalent Circuit Parameters of Power Tap-Off from Insulated Shield Wires of High Voltage Transmission Lines at Different Rated Voltages. ICHVE 2018 - 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. 2019. 4 p.
 9. Tavares M.C., Pissolato J., Portela C.M. New multiphase transmission line model. Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 1998, pp. 489-494.
 10. Panova E.A., Al'brekht A.Ya. Specified Per-unit Parameters of Double-circuit 110 kV Overhead Lines for Distant Fault Location. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4(33), pp. 35-40. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40

Панова Е.А. Учет емкостной проводимости несимметричной одноцепной ЛЭП с грозотросами // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 72-75. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-72-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-72-75)

Panova E.A. Introduction of The Capacitive Conductivity of a Non-Symmetric Single-Circuit Line with Ground Wire. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 72-75. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-72-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-72-75)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бочкарев Алексей Андреевич – студент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, analogsynth@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8834-2384>

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электромеханики, энергетический факультет, Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, elmech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Брякин Иван Васильевич – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией информационно-измерительных систем, Институт машиноведения и автоматизации, Национальная Академия Наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан, bivas2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Букреев Виктор Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, инженерная школа энергетике, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, shandarovaelena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>

Быстров Евгений Андреевич – аспирант, инженерная школа энергетике, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, bystrov-evgen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1829-6845>

Валиуллин Камиль Рафкатович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электро- и теплоэнергетики, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия, ValiullinKamil91@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5053-6370>

Варганова Александра Владимировна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; кафедра менеджмента в энергетике и промышленности, «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия, aleksandra-khlamova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4675-7511>

Волчанина Мария Андреевна – аспирант, кафедра электрических машин и общей электротехники, Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия, kuznetcova994@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3757-5580>

Гилемов Ильдар Галиевич – аспирант, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, gilemov.ig@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-2481-3378>

Горлов Антон Вячеславович – аспирант, кафедра теоретической электротехники, Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия, anton.gorlov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8413-6612>

Дмитриев Степан Александрович – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, dmstepan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8781-2383>

Дмитриева Анна Алексеевна – аспирант, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, Korelina-aa@yandex.ru

Довудов Сарфароз Умедович – аспирант, кафедра электропривода и электрического транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия, dsu_1991@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5600-4615>

Дунаев Михаил Павлович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электропривода и электрического транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия, mdunaev10@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1523-5553>

Иванов Евгений Федорович – аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, ivanov.ef@mmk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5207-2810>

Климаш Владимир Степанович – д-р техн. наук, профессор, кафедра промышленной электроники, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, klimash@yandex.ru

Кузнецов Андрей Альбертович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра теоретической электротехники, Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия, KuznetsovAA@omgups.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1815-4679>

Лыгин Максим Михайлович – аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, eligin@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8884-4846>

Малахов Олег Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, o.malahov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2716-004X>

Николаев Александр Аркадьевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, aa.nikolaev@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5014-4852>

Одинцов Константин Эдуардович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, eltech_mgtu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0699-6016>

Панова Евгения Александровна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, ea.panova@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9392-3346>

Петухов Александр Владимирович – аспирант, кафедра промышленной электроники, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, petuhovaleasander@yandex.ru

Петушков Михаил Юрьевич – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электроники и микроэлектроники, институт энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный

технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, m.petushkov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4154-375X>

Сенюк Михаил Дмитриевич – аспирант, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, mdsenuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5589-7922>

Храмшин Вадим Рифхатович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, институт энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, hvrtmgn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>

Шандарова Елена Борисовна – канд. техн. наук, доцент, инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, shandarovaelena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас опубликовать статьи в журнале «*Электротехнические системы и комплексы*».

Журнал «Электротехнические системы и комплексы» основан в 1996 году на базе международного сборника научных трудов, в котором публиковались статьи студентов, аспирантов и ученых, как из России, так и из-за рубежа. Начиная с 2014 года «Электротехнические системы и комплексы» выпускается как журнал с периодичностью четыре номера в год.

С 02.02.2016 журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по группам научных специальностей 05.09.00 – электротехника, 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление, 05.14.00 – энергетика.

С 26.03.2019 журнал входит в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям:

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки);

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки);

05.09.10 – Электротехнология (технические науки);

05.09.12 – Силовая электроника (технические науки);

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки);

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки);

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки);

05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (технические науки);

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки)

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика (технические науки).

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

- теория и практика автоматизированного электропривода;
- электро- и теплоэнергетика;
- электроснабжение;
- энерго- и ресурсосбережение;
- промышленная электроника, автоматика и системы управления;
- электротехнологии в промышленности;
- информационное, математическое и программное обеспечение технических систем;
- мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования.

Публикация статей является бесплатной.

Статьи, направленные в адрес журнала, проходят обязательное научное рецензирование и редактирование. Несоответствие материалов требованиям к статьям может служить поводом для отказа в публикации.

Статья должна быть набрана в шаблоне, который размещен на сайте журнала esik.magtu.ru в разделе «Руководство для авторов». Там же находится инструкция по его заполнению, в которой приведены требования к оформлению статей.

Авторы статьи должны гарантировать, что их работа публикуется впервые. Если элементы рукописи ранее были опубликованы в другой работе (статье, монографии, автореферате и т.д.), в том числе на другом языке, авторы обязаны сослаться на более раннюю работу. При этом они обязаны указать, в чем существенное отличие новой работы от предыдущей и, вместе с тем, выявить ее связь с результатами исследований и выводами, представленными в предыдущей работе. Дословное копирование собственных работ или ее элементов более чем на 30 % и их перефразирование не приемлемы!

Пакет подаваемых документов (отправляется по электронной почте ecis.red@gmail.com):

- рукопись, оформленная в соответствии с приведенными ниже требованиями;
- анкета (в электронном виде);
- экспертное заключение о возможности опубликования;
- лицензионный договор, подписанный одним автором от коллектива в двух экземплярах;
- согласие на обработку персональных данных на каждого автора.